

공학석사 학위논문

# 근해 조사용 무인잠수정의 개발

Development of a Remotely Operated Vehicle  
for Investigation of the Coastal Sea

지도교수 최 형 식

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 경 기

本 論文을 金敬基의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 유 삼 상 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 조 종 래 (인)

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

Abstract

기호설명

그림목차

표 목차

제 1 장. 서론 .....	1
제 2 장. 수중 로봇의 운동방정식 .....	4
2.1 수중 로봇의 기구학 .....	4
2.2 수중 로봇의 운동방정식 .....	6
2.2.1 오일러 각도 .....	6
2.2.2 선형 속도 변환 .....	7
2.2.3 각속도 변환 .....	7
2.2.4 수중 로봇의 동역학 .....	9
제 3 장. KMU-ROV 기구부 설계 .....	12
3.1 KMU-ROV의 기구부 구성 .....	12
3.2 모터 선정을 위한 추력 계산 .....	16
3.3 제어 하우징 및 DC모터 추진축 방수 설계 .....	19
제 4 장. KMU-ROV 제어시스템 설계 .....	20
4.1 KMU-ROV 제어시스템의 구성 .....	20

4.2 CAN 통신을 이용한 제어기의 네트워크 구성 .....	25
4.3 모터 제어 알고리즘 .....	27
4.3.1 위치 제어 알고리즘 .....	27
4.3.2 정속 제어 알고리즘 .....	32
4.4 센서 구성 및 잠수정 위치 제어 알고리즘 .....	35
4.4.1 KMU-ROV의 센서 구성 .....	35
4.4.2 실시간 복합 PID 제어 알고리즘 .....	38
 제 5 장. 전용 조종기의 개발 .....	 42
5.1 조종기의 구성 .....	42
5.2 6자유도 조종 알고리즘 .....	44
 제 6 장. 실험 및 고찰 .....	 47
6.1 모터의 정속 제어 실험 .....	47
6.2 KMU-ROV의 주행 실험 .....	50
6.3 KMU-ROV의 위치 유지 및 자세 제어 실험 .....	51
6.3.1 KMU-ROV의 호버링 제어 실험 .....	51
6.3.2 KMU-ROV의 깊이 제어 .....	53
6.3.3 KMU-ROV의 방향각 제어 .....	54
6.3.4 해양대 선착장 수중 환경 조사 .....	57
 제 7 장. 결론 .....	 58

## 참고문헌

# Development of a Remotely Operated Vehicle for Investigation of the Coastal Sea

Kyeong Ki Kim

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University

## Abstract

This paper is mainly concerned with the development of a remotely operated vehicle for investigation of the coastal sea. For this, we have designed and constructed the vehicle called KMU-ROV(Korea Maritime University Remotely Operated Vehicle), for purpose of investigation mission under 50m of the sea surface.

We have designed six independent waterproof actuators and the housing of the controller for underwater operation. For six degree of freedom motion, we have analyzed the dynamics of the KMU-ROV and have designed a new composition of six actuators including the driving system. For motion control, we have composed a concurrent velocity control algorithm for controlling the speed of all the actuating motors. The control system for the KMU-ROV is composed of the master DSP, DSP for the motor control and various sensors. We composed the PID control algorithm and a network for controlling motors using the CAN communication.

The performance of the KMU-ROV, we was shown by testing the developed control algorithm and control system under the water.

## 기 호 설 명

$\eta$	위치와 자세 벡터
$\nu$	병진과 회전속도 벡터
$\tau$	수중 로봇의 전체 힘과 모멘트 벡터
$M_{\eta}(\eta)$	강체의 관성행렬
$C_{\eta}(\nu, \eta)$	코리올리 및 원심력 항
$D_{\eta}(\nu, \eta)$	댐핑행렬
$g_{\nu}(\eta)$	중력 힘과 모멘트 벡터
$\tau_{\eta}$	제어 입력 벡터
$D$	잠수정에 가해지는 항력
$C_D$	항력계수
$\rho$	평균 바다 밀도
$A$	잠수정의 투영 면적
$P_m$	모터의 출력
$P_p$	프로펠러의 추진력
$K_m(S)$	모터 엔코더 센서의 회전 속도 값
$K_s(S)$	잠수정의 위치 및 자세 데이터 값

## 그림 목 차

Fig. 2.1 Earth-fixed and Body-fixed coordinate system .....	4
Fig. 3.1 3D modeling of the KMU-ROV .....	13
Fig. 3.2 Outward form of the KMU-ROV .....	13
Fig. 3.3 Actuator configuration for the 6 D.O.F .....	15
Fig. 3.4 Waterproof design of cylinder cover and motor rotor .....	19
Fig. 3.5 Motor cylinder cover and rotor .....	19
Fig. 4.1 Total control system of the KMU-ROV .....	20
Fig. 4.2 Motor controller .....	22
Fig. 4.3 Sensor DSP board .....	23
Fig. 4.4 Motor driver .....	24
Fig. 4.5 Message frame of CAN 2.0A .....	26
Fig. 4.6 Reference profile for motors .....	28
Fig. 4.7 Velocity change in acceleration profile .....	29
Fig. 4.8 Program of the velocity profile .....	30
Fig. 4.9 Program of interrupt routine .....	31
Fig. 4.10 PID controller with feedforward term .....	31
Fig. 4.11 System of the concurrent control .....	32
Fig. 4.12 PID controller for the concurrent control .....	34
Fig. 4.13 Program of the concurrent control .....	34
Fig. 4.14 Interface board of 2 axis tilt sensor .....	36
Fig. 4.15 Magnetic compass .....	36
Fig. 4.16 Pressure sensor ECO-1 .....	37
Fig. 4.17 Waterproof CCD camera .....	37
Fig. 4.18 Realtime hybrid PID controller .....	38

Fig. 4.19 Flow diagram of the realtime hybrid PID control .....	40
Fig. 4.20 Program of the realtime hybrid PID control .....	41
Fig. 5.1 Operating joystick of the KMU-ROV .....	42
Fig. 5.2 View of the text LCD .....	43
Fig. 5.3 The coordinate system of the KMU-ROV .....	44
Fig. 5.4 Definition trust and distance of the KMU-ROV .....	45
Fig. 6.1 Concurrent control with result (Input data 100) .....	47
Fig. 6.2 Concurrent control with result (Input data 300) .....	48
Fig. 6.3 Concurrent control with result (Input data 400) .....	48
Fig. 6.4 Concurrent control with result (Input data 500) .....	49
Fig. 6.5 Sailing test in the sea .....	50
Fig. 6.6 Hovering control test in the sea .....	51
Fig. 6.7 Hovering control with result .....	52
Fig. 6.8 Depth control test in the sea .....	53
Fig. 6.9 Depth control with result (Input data 2m) .....	54
Fig. 6.10 Depth control with result (Input data 4m) .....	54
Fig. 6.11 Yawing control test in the sea .....	55
Fig. 6.12 Yawing control with result .....	56
Fig. 6.13 Underwater investigation in a wharf .....	57



## 표 목 차

Table 2.1	6 D.O.F motion of the underwater robot .....	5
Table 3.1	Mechanism specification of the KMU-ROV .....	14
Table 3.2	Total and modular resistance force for KMU-ROV .....	17
Table 4.1	Specification of the motor controller .....	22
Table 4.2	Sensor of the KMU-ROV .....	35
Table 4.3	Gain of PID control .....	39

# 제 1 장 서 론

과학이 발달함에 따라 인간은 지구뿐 만 아니라 우주까지 탐사를 하게 되었다. 그러나 아직 지구상에서 해양은 탐사되지 않은 곳이 많은 미지의 영역으로 남아 있다. 그 중에서도 심해저는 높은 가치를 지니는 해양 광물의 보고로서 자원 고갈 문제가 심각해지는 현 세계에 많은 관심을 받고 있다. 이러한 해양에 대한 관심과 해양으로부터의 각종 자원개발이 활발해지면서 해저에서 각종 조사, 탐사 및 작업을 수행하는 수중 작업 기술은 지난 20여 년간 해양 활동을 지원하고 해양자원의 개발 및 관리를 지원하는 중요한 수단으로 발전해 왔다. 최근에는 작업의 요구 수심이 깊어지고 원격제어 및 통신 기술이 눈부시게 발전함에 따라 수중 작업 기술이 다양하게 이루어지고 있다[1].

수중 로봇은 해양의 개발이 활발하게 진행되면서 각종 수중작업의 수요가 늘어남으로 인해 그 중요성이 높아지고 있다. 수중 로봇 기술은 해양 기술 자립에 필수적으로 요구 되어 지는 핵심 기술이다. 이들의 기술개발은 주로 심해 생물·생태계 조사, 심해 생명과학 연구, 해저 지질학 연구, 해양 자원 조사 등의 해양 과학조사와 해양 구조물 설치, 해저 모니터링, 해양 에너지 개발, 해저 구난, 해저 지진 감시, 해저 석유 산업분야와 해저 광통신 선로공사 등 민수 부분과 유실물회수, 기뢰 제거 등 특수 군사적인 수요가 주도하고 있다[12].

이 연구의 중심에는 무인잠수정이 있으며, 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 유선 원격제어 무인 잠수정 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 자율 무인 잠수정 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 나눌 수 있다.

ROV는 모선에 연결된 케이블을 통한 수동적인 제어로 구동되고 보통의 경우에는 작업을 위한 매니퓰레이터가 달려있어 정적 혹은 저속의 운동에서 작업을 수행한다. AUV는 원격조종과 동력전달을 하기 위한 별다른 장치 없이 동력원과 스스로 움직이기 위한 제어장치를 갖추고 수중에서 항해를 하며 작업을 할 수 있다.

70년대 초부터 현재에 이르기까지 주로 해양 석유산업의 수요에 의해 발전해 온 유인잠수정과 유선 무인잠수정(ROV)을 제 2세대 잠수정이라고 한다면 AUV는 그보다 발달한 제 3세대 잠수정으로 그 활용도가 크게 증가할 것으로 주목을 받고 있다.[1]

이미 세계 각국에서 많은 연구가 이루어지며 일본의 경우 해양과학연구센터(JAMSTEC)에서 10,000m급의 중 작업 ROV인 '카이코우'가 개발에 성공하였고 3,500m급 AUV '우라시마'가 개발 완료된 상태이다. 우리나라에서는 선진해양국에 비하여 무인잠수정의 개발이 늦었으나, 대우중공업에서 1996년 러시아로부터 6,000m급 AUV의 기술을 도입하여 요소기술을 확보 '옥포 6000'을 개발하였으며, 2001년부터 해양수산부의 6,000m급 무인잠수정 개발 사업을 진행 2006년 해미래를 개발하여 현재 실 해역에서 실험 중이다[10]. 또한 한국 원자력 연구소에서도 원전의 주요 시설에 대한 감시와 점검을 위한 잠수정이 개발되어 운용되고 있다. 방사능에 대한 위험에 노출되어 있어 방사능에 내구성이 강한 잠수정을 개발하여 사용하고 있다[16]. 현재 잠수정의 개발뿐 만 아니라 해저 로봇 팔 기술, 수중 초음파·관성 항법, 도킹 기술 그리고 자세 제어 등 국내의 기업과 대학에서 활발히 연구 중이다.

본 논문에서는 근해에 정박해 있는 선박과 해양 환경을 조사하기 위한 KMU-ROV(Korea Maritime University ROV)라는 무인 잠수정 개발하려고 한다. 그리고 단독으로는 넓은 지역 탐사와 자유로운 항해가 어려운 ROV와 제작비가 비싼 AUV의 장단점을 보완하여 복합적인 시스템의 무인잠수정을 개발하려고 한다. 수심 50m급의 잠수정을 목표로 하여 설계하였고 자세제어, 깊이 제어 및 방향제어 시스템 그리고 CAN 통신을 이용한 모터 제어시스템을 구축하는데 주안점을 두고 개발하였다.

KMU-ROV의 효율적인 주행을 위해 가변적인 입력에 대해 다 수 모터의 정속 제어를 위해 소프트웨어적인 정속 제어 알고리즘을 설계하였다. 그리고 자세 제어, 깊이제어 및 방향제어의 복합적인 자세 및 위치 제어를 위해 실시간 복합 PID제어 알고리즘을 설계하여 선착장에서 성능 시험을 하였다. 6자유도 운동에

대한 6개의 추진기의 관계를 해석하여 관계식을 정립하였다.

이와 같이 근해 조사용 무인 잠수정의 개발에 필요한 6자유도 운동방정식 해석, 제어 알고리즘과 전용 조종기의 개발 등 전체적인 제작과정과 성능 시험에 대해 소개한다.

본 논문의 2장에서는 수중 로봇의 6자유도 운동방정식을 해석하고 간략화 하였고 3장에서는 KMU-ROV의 기구부 설계에 대한 부분으로 추력 계산 및 방수 설계에 대해 설명하였다. 4장에서는 KMU-ROV 제어시스템 즉, CAN통신을 이용한 제어기의 네트워크구성과 모터 제어 알고리즘, 위치 제어 알고리즘에 대해 설명하였다. 그리고 5장에서는 전용 조종기의 개발 과정 및 조종 알고리즘에 대해 논하였다. 6장은 KMU-ROV의 주행 실험 및 위치 제어 실험과 결과를 보였으며, 마지막 7장에서는 결론과 향후 과제에 대해 논하였다.

## 제 2 장 수중 로봇의 운동방정식

### 2.1 수중 로봇의 기구학

6자유도를 지닌 수중 로봇의 운동을 해석하기 위해서 Fig. 2.1에서 표현되는 동체 고정 좌표계(Body-fixed coordinate system)인  $X_0 Y_0 Z_0$ 와 지구 고정 좌표계(Earth-fixed coordinate system)  $XYZ$ 를 정의하여야 한다. 일반적으로 동체 고정 좌표계에서 원점  $O$ 는 무게 중심과 일치시킨다. 수중로봇을 위한 동체 축에서  $X_0$ 은 길이방향의 축,  $Y_0$ 은 횡 방향 축 그리고  $Z_0$ 은 수직방향의 축으로 정의한다. 동체 고정 좌표계에서의 운동은 지구 고정 좌표계에 관하여 표현한다[2].

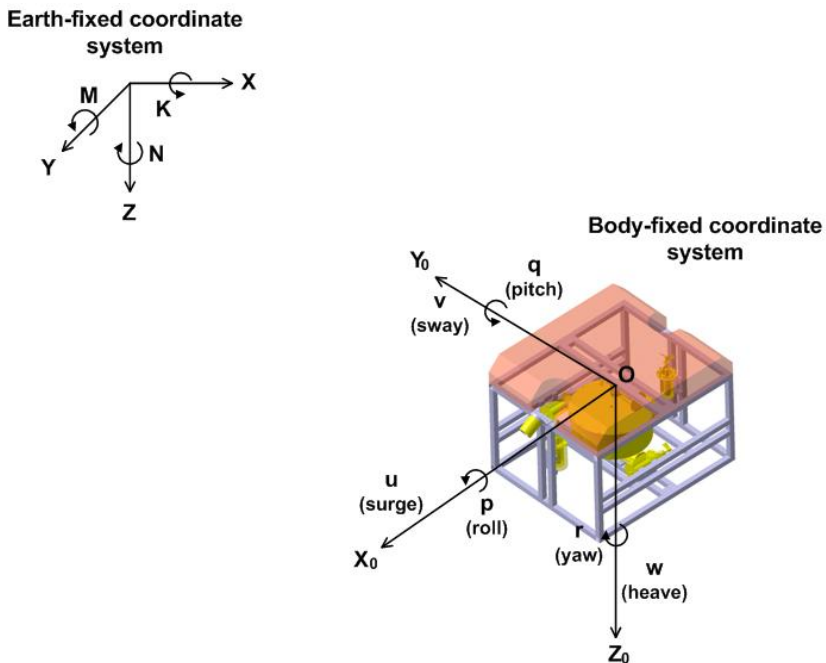


Fig. 2.1 Earth-fixed and body-fixed coordinate system

지구 자체의 공전과 자전에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고 수중 로봇의 속도에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 지구 고정 좌표계는 관성 고정 좌표계(Inertial-fixed coordinate system)이라고도 한다. 따라서 수중 로봇의 위치와 자세는 관성 고정 좌표계를 통해 표현하며, 수중 로봇의 선형 속도와 각 속도는 동체 고정 좌표계에 의해 표현된다.

수중 로봇의 6자유도 운동은 Table 2.1과 같이 정의할 수 있다.

Table 2.1 6 D.O.F motion of the underwater robot

6 자유도 운동	힘, 모멘트	선형 속도와 각속도	위치와 오일러 각도
x축 직선 운동(surge)	$X$	$u$	$x$
y축 직선 운동(sway)	$Y$	$v$	$y$
z축 직선 운동(heavy)	$Z$	$w$	$z$
x축 회전 운동(roll)	$K$	$p$	$\Phi$
y축 회전 운동(pitch)	$M$	$q$	$\theta$
z축 회전 운동(yaw)	$N$	$r$	$\psi$

지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 오일러 각은 기준 좌표계 즉, 본 논문에서는 지구 고정 좌표계를 각 축에 대하여 3번 회전시켜 동체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로 회전은 요( $\psi$ ), 피치( $\theta$ ), 롤( $\Phi$ )의 순으로 정한다. 오일러 각의 경우 동체의 자세가 수직에 가까워지면 자세를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있으나 수중 로봇의 경우 자세가 수직에 가까운 운동이 거의 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다고 판단되어 채택하였다[3].

## 2.2 수중 로봇의 운동방정식

### 2.2.1 오일러 각도

6자유도 수중 로봇의 운동은 식 (2.1)의 벡터들로 묘사할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T & \eta_1 &= [x \ y \ z]^T & \eta_2 &= [\Phi \ \theta \ \psi]^T \\
 \nu &= [\nu_1^T \ \nu_2^T]^T & \nu_1 &= [u \ v \ w]^T & \nu_2 &= [p \ q \ r]^T \\
 \tau &= [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T & \tau_1 &= [X \ Y \ Z]^T & \tau_2 &= [K \ M \ N]^T
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$\eta$  는 지구 고정 좌표계로 표현하는 위치와 자세이고,  $\nu$  는 동체 고정 좌표계로 표현하는 병진과 회전 속도이다. 그리고  $\tau$  는 동체 고정 좌표계로 표현하는 수중 로봇의 전체 힘과 모멘트이다.

동체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계 사이의 병진 속도의 좌표 변환은 식 (2.2)와 같은 행렬로 표현된다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1 \tag{2.2}$$

식 (2.2)를 행렬로 표현하면 식 (2.3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

여기서  $J_1(\eta_2)$  는 오일러 각도 롤( $\Phi$ ), 피치( $\theta$ ), 요( $\psi$ )의 함수를 통해 구성 된 변환 행렬이다.

각 축에 대한 기본적인 회전행렬은 식 (2.4)와 같은 일반적인 각 축에 대한 회전 각도로 나타낸다.

$$C_{x,\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix}, \quad C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

### 2.2.2 선형 속도 변환

직교 좌표 공간상에서 자세는 기준 좌표계의 축에 대한 연속적인 회전으로 일반화시켜서 생각할 수 있다.

3회의 회전을 통해  $J_1(\eta_2)$ 을 변환행렬이라 하며, 수중 로봇은 오일러 각도의 항들로 회전을 표현한다. 오일러 각도를 이용한 좌표 변환은  $z$ 축을 중심으로  $\Phi$ 만큼 회전한 후,  $y$ 축을 중심으로  $\theta$ 만큼 회전시키고 마지막으로  $x$ 축을 중심으로  $\psi$ 만큼 회전하여 식 (2.5)의 행렬로 표현할 수 있다.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\Phi + \cos\psi\sin\theta\sin\Phi & \sin\psi\sin\Phi + \cos\psi\cos\Phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\Phi + \sin\psi\sin\theta\sin\Phi & -\cos\psi\sin\Phi + \sin\psi\sin\theta\cos\Phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\Phi & \cos\theta\cos\Phi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.2.3 각 속도 변환

동체 고정 좌표계로 표현되는 각속도 벡터  $\nu_2 = [p \ q \ r]^T$ 와 오일러 속도 벡터  $\dot{\eta}_2 = [\dot{\Phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ 와의 관계는 변환 행렬  $J_2(\eta_2)$ 에 의해 식 (2.6) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) \nu_2 \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 행렬로 표현하면 식 (2.7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$



지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 자세는 식 (2.8)과 같다.

$$\nu_2 = \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\Phi} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\Phi} \cdot C_{y,\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2 \quad (2.8)$$

식 (2.8)로부터 변환행렬  $J_2(\eta_2)$ 을 행렬로 나타내면 식 (2.9)와 같다.

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi \tan\theta & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \frac{\sin\Phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\Phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2개의 오일러 각도  $J_1(\eta_2)$ 와  $J_2(\eta_2)$ 의 표현으로 기구학적 방정식을 표현하면 식 (2.10)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

지구 고정 좌표계에 대한 수중 로봇의 속도와 각속도는 오일러 각을 이용하여 다음의 식 (2.11)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos\psi \cos\theta + v [\cos\psi \sin\theta \sin\Phi - \sin\psi \cos\Phi] + w [\cos\psi \sin\theta \sin\Phi + \sin\psi \sin\Phi] \\ \dot{y} &= u \sin\psi \cos\theta + v [\sin\psi \sin\theta \sin\Phi + \cos\psi \cos\Phi] + w [\sin\psi \sin\theta \sin\Phi - \cos\psi \sin\Phi] \\ \dot{z} &= -\sin\theta + v \cos\theta \sin\psi + w \cos\theta \sin\Phi \\ \dot{\Phi} &= p + q \sin\Phi \tan\theta + r \cos\Phi \tan\theta \\ \dot{\theta} &= q \cos\Phi - r \sin\Phi \\ \dot{\psi} &= \frac{(q \sin\Phi + r \cos\Phi)}{\cos\theta} \end{aligned} \quad (2.11)$$

## 2.2.4 수중 로봇의 동역학

수중 로봇의 6자유도 비선형 운동방정식은 식 (2.12)와 같다.

$$M_\eta(\eta)\dot{\nu} + C_\eta(\eta)\nu + D_\eta(\eta)\nu + g_\nu(\eta) = \tau_\eta \quad (2.12)$$

이 식에서  $M_\eta(\eta)$  는 강체의 관성행렬,  $C_\eta(\nu, \eta)$ 는 코리올리 및 원심력 항,  $D_\eta(\nu, \eta)$ 는 댐핑행렬,  $g_\nu(\eta)$ 는 부력을 포함한 중력 힘과 모멘트 벡터,  $\tau_\eta$ 는 제어 입력 벡터이다.  $\eta = [x, y, z, \Phi, \theta, \psi]^T$  는 지구 고정 좌표계에서의 위치와 오일러 각이며,  $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$  는 동체 고정 좌표계에서의 속도와 회전 각속도이다[4].

강체의 관성 행렬  $M_\eta$ 은 식 (2.13)과 같다.

$$M_\eta = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yz} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

여기서  $I$ 행렬은 단위행렬이며,  $S(r_G)$ 는 지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 원점의 벡터  $r_G = (x_G, y_G, z_G)^T$ 의 왜대칭행렬이다.

그리고  $x_G, y_G, z_G$ 은 지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 원점이다.

지구 고정 좌표계에 대한 코리올리 및 원심력 항  $C_\eta(\nu)\nu$ 은 식 (2.14)의 6×6 관성행렬로부터 식(2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$C_\eta(\nu)\nu = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) \\ -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) & -S(M_{21}\nu_1 + M_{22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G p - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & -m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) & I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

수중로봇의 댐핑행렬  $D_\eta(\nu)$ 은 식 (2.16)처럼 대각행렬로 나타낼 수 있다.

$$D_\eta(\nu) = -diag[X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r] \quad (2.16)$$

$$-diag[X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|]$$

운동 방정식의 단순화를 위해 동체 고정 좌표계의 원점이 부력 중심과 일치한다는 가정을 하고 부력을 포함한 중력 힘과 모멘트 벡터  $g_\nu(\eta)$ 을 무시한 수중 로봇의 6자유도 운동은 식 (2.17)과 같다[4].

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= \Sigma Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - up + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= \Sigma K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= \Sigma M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= \Sigma N \end{aligned} \quad (2.17)$$

수중 로봇의 운동에 영향을 미치는 유체 정역학, 유체 동역학 댐핑, 프로펠러 추진과 토크 등을 포함한 힘과 모멘트의 운동방정식에서 제어 입력 값인 가속도 항을 분리한 6자유도 운동방정식을 행렬 형태로 단순화하면 식 (2.18)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{w} \\ \ddot{p} \\ \ddot{q} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2}L^3X_u & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m - \frac{\rho}{2}L^3Y_v & 0 & -mz_G - \frac{\rho}{2}L^4Y_p & 0 & mx_G - \frac{\rho}{2}L^4Y_q \\ 0 & 0 & m - \frac{\rho}{2}L^3Z_w & my_G & -mx_G - \frac{\rho}{2}L^4Z_q & 0 \\ 0 & -mz_G + \frac{\rho}{2}L^3K_v & -I_{xy}\dot{q} + my_G & I_x - \frac{\rho}{2}L^6K_p & -I_{xy} & I_{wy} - \frac{\rho}{2}L^6K_r \\ mz_G & 0 & -mx_G + \frac{\rho}{2}L^4M_u & -I_{xy} & I_y - \frac{\rho}{2}L^6M_q & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G - \frac{\rho}{2}L^4N_v & 0 & I_{wy} + \frac{\rho}{2}L^6N_p & -I_{yz} & I_z - \frac{\rho}{2}L^6N_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma X \\ \Sigma Y \\ \Sigma Z \\ \Sigma K \\ \Sigma M \\ \Sigma N \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

## 제 3 장 KMU-ROV 기구부 설계

### 3.1 KMU-ROV 기구부 구성

무인 잠수정의 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 항해 형태로 비교적 넓은 영역을 조사하기 위해 빠른 속도를 요구하는 잠수정의 형태이다. 이러한 형태는 선체의 유체저항을 최소화하기 위해 유선형의 선체로 제작되며, 종축 방향의 주 추진기를 이용하여 운동을 제어한다. 두 번째는 항해 영역보다는 해저나 수중 구조물 등의 정밀 조사를 목적으로 하여 자기 위치 유지 및 자세제어에 용이하도록 여러 대의 추진기를 6 자유도 운동제어에 적합하도록 각도를 가지고 배치하는 형태이다[5].

본 논문의 KMU-ROV는 수심 50m급을 목표로 근해에 정박해 있는 선박과 해양 환경을 조사하기 위한 무인 잠수정으로 자기 위치 유지 및 자세제어에 용이하도록 추진기 배치가 편한 Fig. 3.1과 Fig. 3.2와 같이 육면체 형태의 오픈 프레임으로 제작하였다.

제어를 위한 제어시스템 및 전력 공급용 배터리를 내장한 제어 하우징이 잠수정의 내부에 설치되어 있으며 일반 DC 모터를 수중에서 사용하기 위한 방수 실린더 6개가 각 면에 장착되어 있다.

모터로의 전원 공급과 정속 제어를 위한 엔코더 신호선은 방수커넥터를 이용하여 제어하우징과 연결되어 있다. 그리고 잠수정의 상단에 부력재를 부착할 수 있는 공간을 두어 부력 조절을 용이하도록 하였으며 잠수정의 전방에는 관측 장비로써 방수 CCD 카메라가 장착되어 있다.

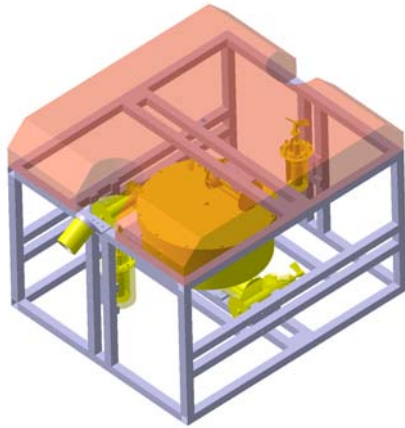


Fig. 3.1 3D modeling of the KMU-ROV

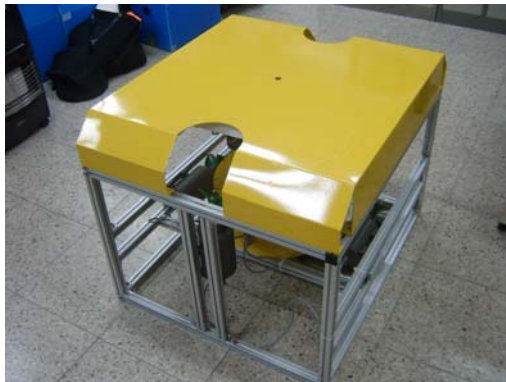


Fig. 3.2 Outward form of the KMU-ROV

이러한 KMU-ROV의 사용 목적을 이루기 위한 기구적 사양은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Mechanism specification of the KMU-ROV

구 분	사 양
부 피	792 × 920 × 713 mm
무 게	50 kgf
최대 작업 수심	50 m
최대 속도	2 knots (1.028 m/s)
추진기	90W DC motor × 6
제어 자유도	6 D.O.F
관측 장비	CCD camera (410K pixel)

수중 작업 시 발생하는 외란에 효과적으로 대응하기 위해서는 잠수정이 가지고 있는 추진기를 통해 전 방향으로 균일하게 힘이나 모멘트를 발생시킬 수 있어야 한다[5].

KMU-ROV는 6자유도 즉, 전 방향 구동을 위해 Fig. 3.3과 같이 육면체 각 면에 하나씩 6개의 추진기를 장착하는 추진기 배치를 선택하였다.

6자유도 운동을 위해 6개의 추진기를 사용하는 경우 각 자유도에 대해 같은 크기의 출력을 내는 것이 가장 이상적이다. 따라서 KMU-ROV는 각 면에 하나의 추진기를 장착하여 그 추진기가 2자유도 운동에 영향을 주도록 하였으며 6자유도 전 방향 운동을 위해 동일 축에 있는 모터 2개는 2자유도 운동을 위해 사용되도록 하였다. 이러한 추진기 배치는 각 자유도에 대해 일정한 출력을 얻을 수 있으며 제어가 용이한 장점이 있다.

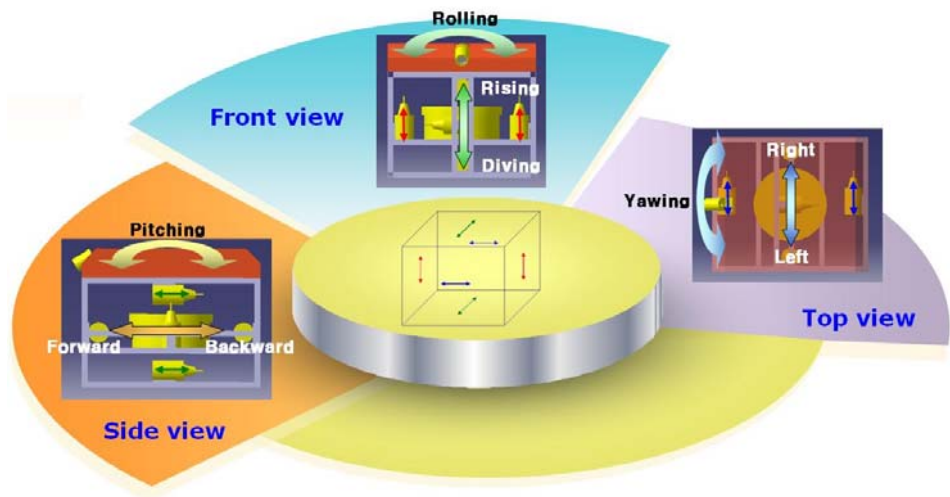


Fig. 3.3 Actuator configuration for the 6 D.O.F



### 3.2 모터 선정을 위한 추력 계산

무인 잠수정은 수중에서 받는 항력보다 큰 출력을 낼 수 있어야 하며 KMU-ROV의 추진기인 모터를 선정하기 위해 항력 계산이 필요하다. 본 논문의 KMU-ROV는 선체의 자기 위치 유지 및 자세제어를 우선의 목표로 하기 때문에 모터 선정을 위한 선체의 항력 계산은 수중의 복잡한 비선형 계수를 단순화하여 항력을 구하고 그 항력을 충분히 이길 수 있는 출력으로 여유롭게 모터를 선정하였다. 즉, 본 절의 추력 계산은 선정한 모터가 선체의 항력을 능가하는 것을 목표로 두고 해석하였다.

선체의 최고 속력은 2knots (1.028m/s)를 목표로 한다. 그리고 60W DC 모터를 선정하고 역으로 항력 계산을 하여 출력이 항력을 이길 수 있는지를 알아본다.

외란을 무시하였을 때 수중에서 KMU-ROV에 가해지는 항력은 식 (3.1)과 같다. 여기서  $D$ 는 항력[N],  $C_D$ 는 항력계수로 0.2이며,  $\rho$ 는 평균 바다의 밀도인 1,029 [ $kg/m^3$ ]이다.  $v$ 는 정지해있는 유체에 대해 KMU-ROV의 최대 속도이며 1.028 [m/s]로 한다. 그리고  $A$ 는 전면 투영 면적 [ $m^2$ ]이다[6].

$$D = C_D \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (3.1)$$

항력 계산을 위해 KMU-ROV를 각 부분으로 모듈화 하였으며, 식 (3.1)을 이용하여 각 모듈의 항력을 계산하여 Table 3.2에 정리하였다.

KMU-ROV는 종방향과 횡방향의 운동에 대한 추력이 같으나 종단면과 횡단면의 투영 면적이 다르므로 두 가지의 경우에 대한 항력 계산을 필요로 한다. 그리고 두 가지의 경우 중 보다 큰 항력을 기준으로 추력을 계산하여 모터 선정을 하였다.

Table 3.2 Total and modular resistance force for KMU-ROV

구분	투영 사진	투영 면적	항 력
종방향		350,371.5 $mm^2$	38.1 $N$
횡방향		404,480.5 $mm^2$	42.8 $N$

횡방향에서 받는 항력이 가장 크므로 KMU-ROV의 최대 항력은 42.8[N]으로 추력을 계산한다.

총 항력  $D$ 는 추진축 모터 2개가 받는 항력이므로 모터 1개당 받는 항력은 21.4[N]이다. 이 항력을 이길 수 있는 모터의 토크를 위해 모터의 최대 회전수는 5000[rpm]으로 제한한다.

$$P_m = 2\pi nQ = 60[W] \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서  $n$ 은 회전수(rps)이며, 5000[rpm]에서 모터의 토크  $Q$ 는 0.114[Nm] 이다.

모터 1개 당 내야하는 추진동력은 항력과 최대속도 곱으로 약 22[W]인 것을 알 수 있다. 이는 프로펠러가 내야할 추진력으로 생각할 수 있다.

$$P_p = 2\pi nQ \times 0.95 \quad (3.3)$$

식 (3.3)에서 0.95는 프로펠러 효율이다. 일반 선박의 프로펠러는 약 2%의 손실을 갖는다고 가정하지만 본 연구에서는 제작여건 상 5%의 손실을 가정하여 안전범위를 넓혀 추진력을 얻도록 하였다[6].

식 (3.3)에서 프로펠러 효율을 고려한 필요 회전수는 32[rps] 인 것을 알 수 있다.

필요 추진력을 내기 위해 4.8:1의 감속기를 사용하였으며 그에 따른 5000[rpm]에서의 토크는  $0.75[Nm]$ , 감속기 효율이 0.8인 것을 감안한 프로펠러의 회전수는 18[rps]이다.

따라서 최종적으로 얻은 토크와 회전수로부터 프로펠러의 추진력이  $67.8[W]$  인 것을 알 수 있다. 프로펠러의 항력을 생각하지 않고 구한 추력이라 하더라도 요구되는 프로펠러의 추력보다 약 3배 이상의 큰 추력을 얻을 수 있다. 이는 모터의 속도 제어 시 프로펠러의 항력을 배제할 수 있을 정도의 값이다. 즉, 보다 약 조건 속에서도 요구되는 추력을 낼 수 있으며 목표한 최고 속도보다 빠르게 주행할 수도 있다.

### 3.3 제어 하우징 및 DC모터 추진축 방수 설계

무인 잠수정을 제작하는데 있어서 가장 기본적이고 중요시 되는 부분이 선체 방수와 추진축 부분의 방수이다. KMU-ROV는 가격이 저렴하며 유지보수가 쉬운 O링과 소형 미케니컬 씰을 이용하여 방수를 해결하였다.

Fig. 3.4와 같이 제어하우징 덮개 및 추진기 실린더 덮개는 일체형 보다는 유지보수가 쉽도록 O링 2개를 사용하여 2중 방수 설계를 하였고, 누수 가능성이 가장 높은 모터의 추진축 부분은 미케니컬 씰을 이용하여 방수 설계하였다. Fig. 3.5는 실제 제작한 모터 실린더의 모습이다.

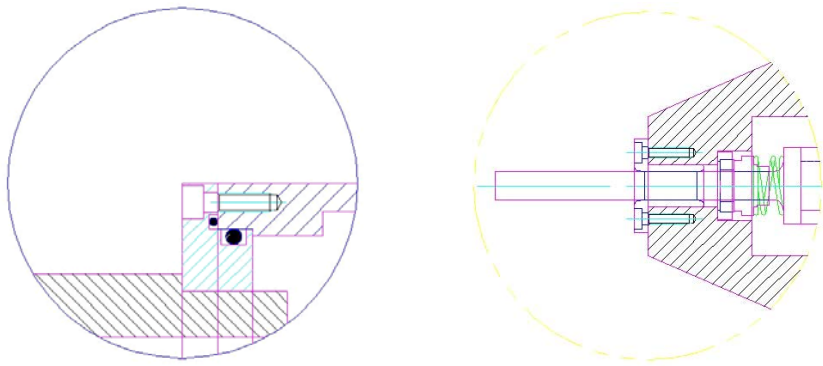


Fig. 3.4 Waterproof design of cylinder cover and motor rotor



Fig. 3.5 Motor cylinder cover and rotor

## 제 4 장 KMU-ROV 제어시스템 설계

### 4.1 KMU-ROV 제어시스템의 구성

KMU-ROV를 제어하기 위한 전체 시스템 구성도는 Fig. 4.1과 같다. 제어 시스템은 크게 전용 조종기, 주 제어기, 모터제어기, 서보모터 드라이버 및 센서부로 구성된다.

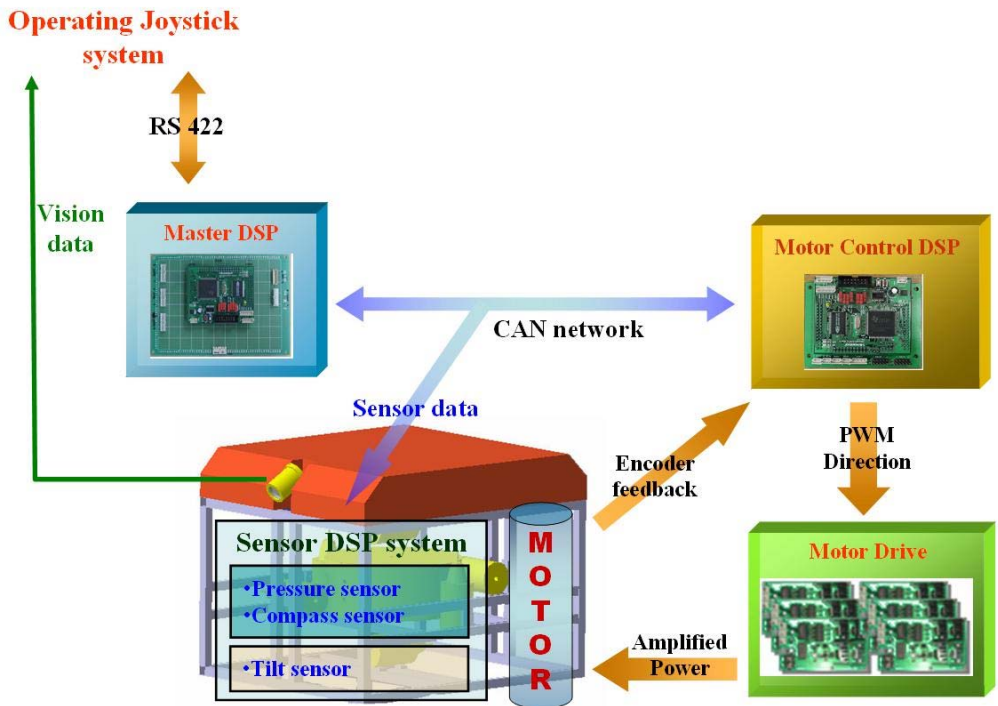


Fig. 4.1 Total control system of the KMU-ROV

일반적으로 원격조종의 경우에 외부에서 인간이 참여하여 수중의 상황에 따라 지속적으로 제어신호를 보내는 Tele-operation 방식의 제어를 한다.

하지만 본 논문의 KMU-ROV는 자세제어(hovering), 깊이제어 및 방향제어를 외부의 조작 없이 잠수정이 능동적으로 처리하여 수중 작업의 편리와 효율성을 높여준다. 정확히 말하면 KMU-ROV는 ROV(원격조종)과 AUV(자율제어)의 복합적인 무인잠수정이라 할 수 있다.

KMU-ROV는 6개의 모터와 자세제어, 깊이제어 및 방향제어를 위한 센서들이 있다. 모터 제어와 센서데이터 처리를 위한 컨트롤러로써 DSP를 사용하며 Master DSP, 3개의 모터 제어기 그리고 센서 DSP 보드로 구성된다. 이러한 DSP(TMS320LF2407A) 간에는 잡음에 강하고 신뢰성이 높은 CAN통신으로 네트워크를 구성하였다[7].

전용 조종기는 제어 시스템의 최상위 제어기가 되어 장거리 통신이 가능한 RS 422통신을 이용하여 KMU-ROV에게 작업 명령 송신하거나 잠수정의 상황을 모니터링하고 카메라로부터 영상을 받아 자료를 수집한다.

Master DSP는 전용 조종기로부터 원격으로 잠수정의 구동 데이터를 받으며 동시에 센서 DSP 보드로부터 위치 및 자세의 데이터를 받아 위치 유지 및 자세유지를 위한 제어알고리즘의 입력으로 처리하여 각 모터의 속도 데이터 값을 출력한다. 얻어진 모터의 속도 데이터는 CAN통신으로 각각의 모터 제어기로 송신한다.

모터 제어기는 Master DSP로부터 모터의 속도 데이터를 수신하여 모터를 구동하면서 정속 제어를 위해 엔코더(encoder) 신호를 피드백 받아 폐루프(close loop)시스템을 이룬다. 여기서 모터 제어기는 모터 제어용 마이크로프로세서인 DSP(TMS320LF2407A)를 사용하며 2개의 모터를 동시 제어할 수 있도록 2개의 엔코더 카운터를 내장한 모터 전용 제어보드를 직접 제작하여 Fig. 4.2와 같이 DSP에 장착하였다. 그 사양은 Table 4.1과 같다.



Fig. 4.2 Motor controller

Table 4.1 Specification of the motor controller

부 품	품 명	기 능
MCU	TMS320LF2407A	PWM, Encoder counter, UART, Timer, GPIO
Level Shifter	74LVHT4245	3.3V ↔ 5V
Dead Time Generator	CD4538	Dual Precision Monostable

Master DSP의 통신 속도와 신뢰성을 위해 위치 유지 및 자세 제어를 위한 각 센서의 데이터를 수집하고 CAN 통신을 이용해 센서 데이터를 전달하는 별도의 센서 DSP 보드를 Fig. 4.3과 같이 제작하였으며 자세한 설명은 4.3절에서 하도록 하겠다.

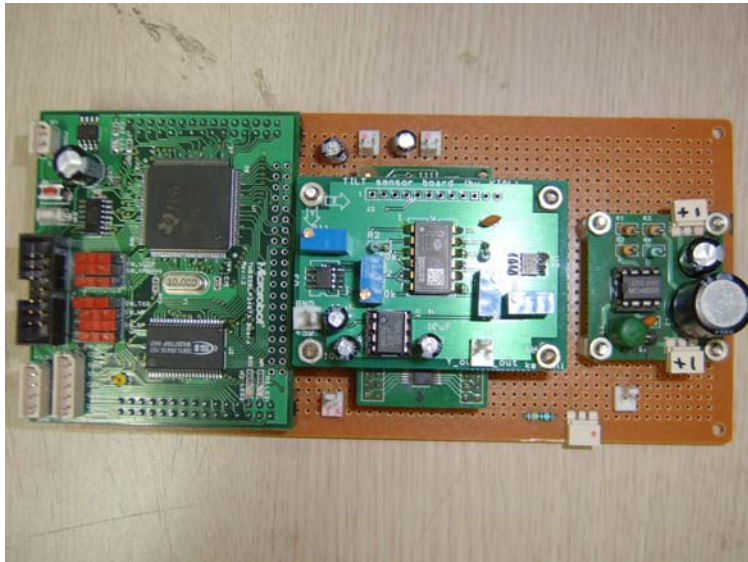


Fig. 4.3 Sensor DSP board

모터를 구동하기 위해 모터 제어기의 DSP에서 출력되는 PWM(Pulse Width Modulation)은 DSP 프로세서의 사용전압으로 실제 모터를 구동시켜야 하는 15V의 전압보다 작은 값이다. 따라서 모터를 구동하기 전에 15V로 증폭시켜 주어야 한다. 이러한 역할을 하는 것이 모터드라이버다.

모터드라이버는 구동 모터 제어기에서 제어알고리즘에 따라 출력되는 PWM과 모터 전방향 신호에 따라 PWM 듀티비(duty rate)에 비례 증폭되어 모터에 전원을 공급한다. 파워 트랜지스터와 브릿지 회로를 구성하여 모터드라이버를 Fig. 4.4와 같이 직접 제작하였다.





Fig. 4.4 Motor driver

## 4.2 CAN 통신을 이용한 제어기의 네트워크 구성

여러 개의 모터제어용 DSP와 이것을 관리하는 하나의 Master DSP간의 효율적인 통신을 위해서는 네트워크 통신이 필요하다. 하지만 직렬통신을 이용하여 네트워크를 구성할 경우 속도와 통신거리에 따른 통신의 신뢰성을 보장 받지 못하게 되며 각 모터 제어기에 잦은 인터럽트 발생으로 인해서 구동 시에 데이터 오류 및 오동작의 원인으로 발생하게 된다. 또한 본 논문에서 개발한 KMU-ROV는 분산제어방식으로 그에 적합한 CAN통신 네트워크를 구성하였다.

CAN(Controller Area Network)은 초기에 자동차 산업분야에 적용하기 위해 고안된 시리얼 네트워크 통신방식이며 근래에는 자동차 분야뿐만 아니라 산업 전 분야에 폭넓게 적용되고 있다. 임베디드 시스템에서 일반적으로 CAN 버스는 마이크로프로세서 사이에서 통신망을 형성하며, 2가닥의 꼬임선(Twist pair wire)으로 연결되어 반이중통신 방식으로 짧은 메시지를 사용하는 고속응용시스템에 적합하다. 또한 외부 요인인 노이즈 등에 강인성을 가지고 있어 통신 에러율을 최소화하여 높은 신뢰성을 보인다.

다중 통신(Multu master communication)의 장점을 가지고 있는 CAN 통신은 2가지의 규격으로 분류되어지는데 표준 모드인 CAN 2.0A를 사용하였다. KMU-ROV 제어시스템의 CAN 통신은 DSP(TMS320LF2407A)에 포함되어 있는 CAN 컨트롤러를 바탕으로 CAN 컨트롤러 인터페이스인 SN65HVD231D라는 3.3V용 트랜시버를 사용하였다.

Fig. 4.5는 KMU-ROV에 사용된 CAN 2.0A의 메시지 프레임 구조이다. 11개의 비트로 구성된 식별자 영역과 64비트의 데이터 영역으로 구성되며 식별자 영역에 수신측의 고유 식별자(ID)가 표시되어 데이터를 해당 프로세서로 전송하게 된다.[7]

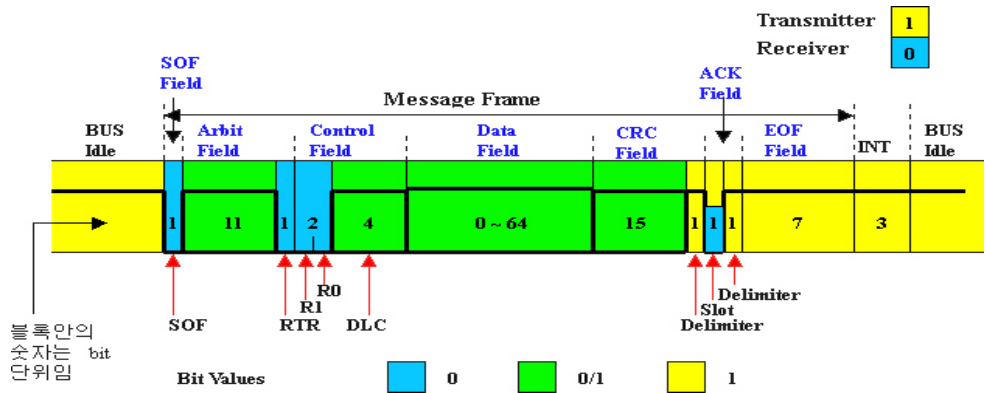


Fig. 4.5 Message frame of CAN 2.0A

CAN 통신은 1회 송신 시 가능한 데이터의 양은 64비트이며 16비트씩 나누어 4개의 메일박스를 이용하여 송수신한다. KMU-ROV의 통신네트워크에서는 DSP프로세서 식별자, 모터 식별자, 모터 속도 그리고 센서 데이터를 송수신한다.

### 4.3 모터 제어 알고리즘

로봇에 사용되는 모터는 그 용도에 따라 위치 제어 및 속도 제어로 나눌 수 있다. 먼저 모터의 위치 제어란 엔코더(encoder)로부터 모터의 회전 위치 데이터를 입력받아 원하는 각도 및 회전수만큼 구동시키는 것이다. 속도 제어란 위치와 상관없이 원하는 속도(rps)로 회전시키는 것으로 본 논문에서는 KMU-ROV의 주행 성능 중 직진성에 직접적으로 연관되는 정속 제어 알고리즘을 설계하고 프로그래밍 하였다.

#### 4.3.1 위치 제어 알고리즘

로봇을 원하는 경로에 따라 원하는 속도로 제어하기 위해서는 적합한 경로 궤적을 설계하고 이에 따라서 구동 모터의 위치와 속도를 제어하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서 사용된 DSP(TMS320LF2407A) 모터 제어용 마이크로프로세서를 이용하여 구동 모터의 위치와 속도를 제어하기 위한 경로 궤적을 설계하였다. 이는 메모리 용량이 제한적이므로 궤적을 추종하는 경로 점의 설정이 1000 이내로 제한적이다. 모터의 경로 추종을 위한 입력 데이터를 생성하기 위해서는 우선적으로 제어의 목표 값으로 이용되는 목표궤적을 설정해야 하며, 궤적 중에는 연속적인 많은 경로 점들의 집합으로 불리는 “구동프로파일”을 생성해야 한다. 이를 이용하여 실제 모터의 상태와 추종해야 하는 구동프로파일 상의 상태와 비교해서 발생하는 오차를 제거하는 PID제어 알고리즘을 적용한다.

Fig. 4.5과 같이 보편적인 사다리꼴 속도와 이에 상응하는 가속도 및 위치 궤적을 적용하였다.

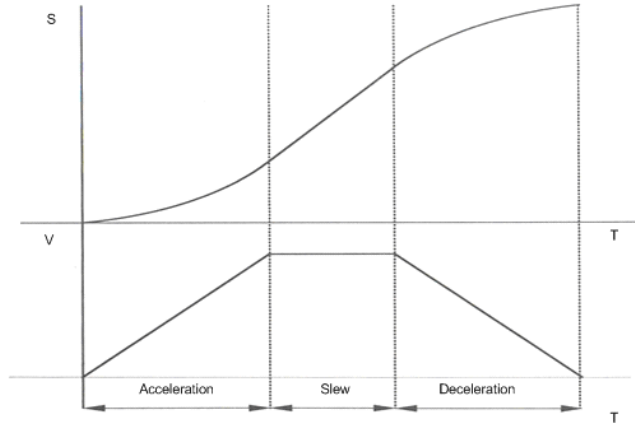


Fig. 4.6 Reference profile for motors

구동 모터들이 추종해야 할 궤적은 위치 궤적과 이의 도함수인 속도 및 가속도 궤적으로 구성된다. 경로 궤적 상의 1000개 정도의 경유 점을 오프라인 상에서 궤적 표를 구성하여 설정하고 모터가 이들을 추종하게 제어한다. 인터럽트 주파수가 빨라질수록 구동 프로파일의 Table에 많은 점들을 생성하여 이들을 경유하게 되고 속도가 부드러워 지는 반면 CPU에 많은 부하가 걸리게 되므로 고속의 CPU를 필요로 하게 된다.

500Hz의 인터럽트 주파수를 생성하여 계산이 비교적 간단하고 저가의 DSP에서도 사용이 가능한 사다리꼴 속도 궤적을 식 (4.1)과 같이 설계하였다.

$$S_t = S_a + S_c + S_r \quad (4.1)$$

$S_t$ 는 총 이동거리,  $S_a$ 와  $S_r$ 은 각각 가속시 이동거리이며  $S_c$ 는 등속시 이동거리이다.  $S_t$ 가 역기구학 해석에 의해 결정되면  $S_a$ 와  $S_r$ 을 임의로 결정하여  $S_c$ 를 결정할 수 있다.

여기서 일반적으로  $S_a$ ,  $S_r$ 과 최고속도  $V_{\max}$ , 가속시간  $T_a$ 의 관계는 식

(4.2)와 같으며, 가속시간과 감속시간은 동일하게 설정하도록 하였다.

$$S_a = S_r = \frac{V_{\max} \times T_a}{2} \quad (4.2)$$

구동모터가 목적지까지 도착하는 시간 즉, 모터의 회전수와 각도가 목표치까지 도달하는 시간  $T_t$ 는 가감속 시간과 등속시간의 합이다.

$$T_t = T_a + T_r + \frac{S_c}{V_{\max}} \quad (4.3)$$

DSP의 인터럽트 주기를  $I_p$ 라고 한다면 가감속과 등속시의 인터럽트 발생 횟수는 각각  $\frac{T_a}{I_p}$ 와  $\frac{T_r}{I_p}$  그리고  $\frac{S_c}{V_{\max} \times I_p}$ 이며, 총 인터럽트 발생횟수는 이들의 합으로 알 수 있다.

먼저, 인터럽트 주기를 결정하고 이동하고자 하는 거리를 받아서 총 인터럽트 발생횟수를 계산하고 이를 가감속과 등속 구간으로 나누어 속도 프로파일을 생성하였다.

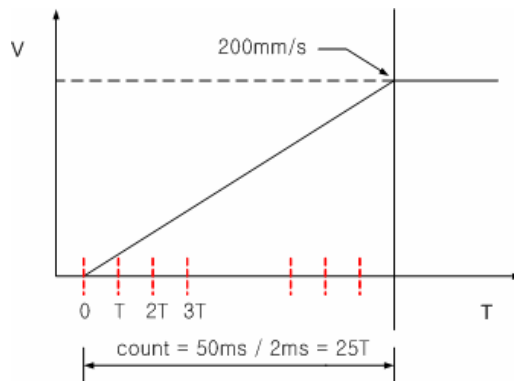


Fig. 4.7 Velocity change in acceleration profile

가속구간과 감속구간은 궤적 추종을 잘 할 수 있도록 신속한 제어를 위해 미리 off-line에서 자동 연산한 모터의 기준속도를 테이블로 만들었다. 여기서 위치테이블은 설계한 속도테이블을 매 인터럽트마다 적분하여 생성한다.

Fig. 4.7의 가속 구간에 속하는 위치 궤적은 S자형의 위치프로파일로써 식 (4.4)로 표현된다. 이 식을 마이크로프로세서에 적용하기 위해서 512개의 위치 경로 점을 생성하였고, 속도는 매 인터럽트 시간은 1ms 내에서 미분하여 적용하였다.

$$\begin{aligned}y &= a + bt + ct^2 + dt^3 \\ \dot{y} &= b + 2ct + 3dt^2 \\ \ddot{y} &= 2c + 6dt\end{aligned}\quad (4.4)$$

식 (4.4)는 위치, 속도 및 가속도 함수를 나타내며 Fig. 4.8과 같이 프로그램으로 구현하였다.

```
//가속구간
if(Int_time <= (unsigned long)Acc_time)
{
    Acc_passtime++;
    Velocity = (double)(Acc * Acc_passtime);
    Acc_position = (double)(Acc * Acc_passtime * Acc_passtime / 2.0);
    Pre_position = Acc_position;
}

//등속구간
else if(Int_time > (unsigned long)Acc_time && Int_time <= (unsigned long)(Uni_time+Acc_time))
{
    Uni_passtime++;
    Velocity = Uni_velocity;
    Uni_position = (double)(Acc_position + (Uni_velocity * Uni_passtime));
    Pre_position = Uni_position;
}

//감속구간
else if(Int_time > (unsigned long)(Uni_time+Acc_time) && Int_time <= (unsigned long)Total_time)
{
    Drop_passtime++;
    Velocity = (double)(Uni_velocity + Drop_acc * Drop_passtime);
    Drop_position = (double)(Uni_position + (Uni_velocity+Velocity)*Drop_passtime / 2.0);
    Pre_position = Drop_position;
}
```

Fig. 4.8 Program of the velocity profile

가감속 구간의 궤적에 따라 얻어지는 속도 값은 연산시간이 적게 걸리고 실용성이 높아 로봇에 일반적으로 사용되는 PID 제어기를 적용하여 모터 구동을 위한 출력 값을 얻는다. 이 PID 제어기를 매우 짧은 1ms 인터럽트 시간 동안 연산하여 모터에 적용하였다. 인터럽트 시간 안에서 수행되는 기본 동작을 간략화 하면 Fig. 4.9와 같다.

```
void interrupt_timer()          /*period = 1ms*/
{
    position = ReadEncoder();
    Err = Target_position - position;
    PID_output = Kp*Err + Ki*Errsum + Kd*(Err - Err_old);
    PWM_DUTY = PID_output;
    Err_old = Err;
}
```

Fig. 4.9 Program of interrupt routine

수행되는 동작에서 사용되는 제어기는 Fig. 4.10과 같이 Feed-forward 항을 갖는 PID 제어기를 적용하였다.

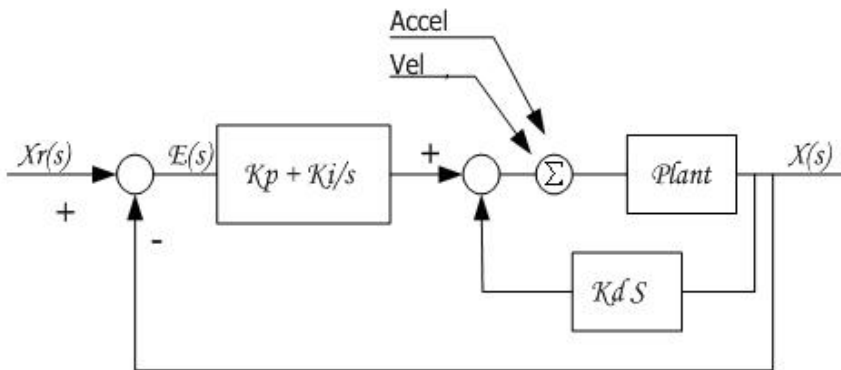


Fig. 4.10 PID controller with feedforward term



### 4.3.2 정속 제어 알고리즘

KMU-ROV의 직진 주행 시 대칭면에 장착되어있는 2개의 모터를 사용하게 된다. 이 때 각 모터의 속도가 같지 않다면 직진을 할 수 없고 어느 한쪽으로 방향이 치우쳐 주행을 하게 된다. 따라서 2개의 모터가 같은 속도로 회전시키는 정속 제어는 무인 잠수정에 있어 아주 중요한 부분이다.

모터의 정속제어를 하는 경우 그 대부분이 피드백 제어에 의한 서보기술이 사용되고 있다. 특히 고정밀도의 정속성을 요구하는 경우는 서보기술이 필수이며, F-V제어나 PLL제어가 있다[17].

Fig. 4.11(a)는 모터를 정속제어하기 위한 기본 하드웨어 구성이다. 그런데 모터의 정속제어를 하기 위해서는 N이라는 속도 검출부와 S라고 하는 기준 전압 발생부, 거기에 양자를 비교하는 비교부 C, 나아가 이 편차신호를 증폭시키는 전력 증폭부 P를 필요로 한다.

모터를 정속제어하는 경우 어떠한 모터일지라도 이러한 4개의 기본요소를 필요로 한다.

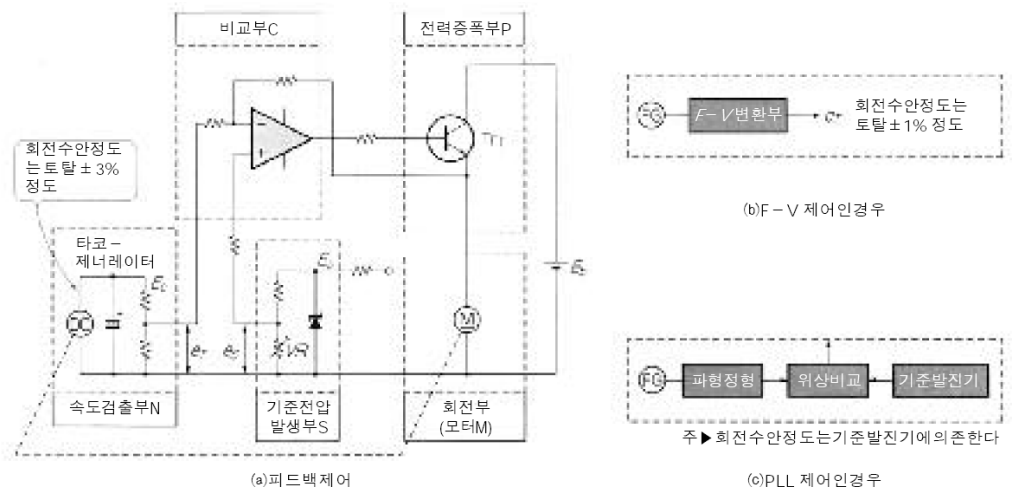


Fig. 4.11 System of the concurrent control

첫째로 기준전압 발생부 S는 비교제어의 기준이 되는 것으로서, 여기에서는 안정화된 직류전압이 부여된다.

둘째로 속도검출부 N은 모터의 타코-제너레이터에서 인출된 신호를 조정하여 다른 한쪽의 비교신호로서 이용된다.

셋째로 비교부 C는 기준전압과 모터의 회전수에 대응한 전압을 비교하여 그 편차 신호를 출력한다. 또한 이 부분에서는 아날로그 비교회로가 사용되지만 그 내부 회로는 단순한 OP앰프이다.

마지막으로 전력증폭부 P는 편차신호를 증폭하여 큰 전력에너지로서 모터에 공급한다. 이들 일련의 동작으로 모터는 구동되고, 나아가 동축상의 타코-제너레이터가 이 회전을 검지하여 속도검출부에 피드백한다.

이러한 과정에서 최종적으로 기준전압과 모터 회전수에 대응한 전압이 동일한 상태로 제어계의 밸런스가 잡혀 모터를 정속으로 회전시킬 수 있다.

이 제어계에서 Fig. 4.11(b)와 같이 타코-제너레이터를 주파수 발생기로 변환하고 F-V제어에 의한 정속제어회로를 만들 수 있다. 또 Fig. 4.11(c)와 같이 기준전압 발생부를 수정 발진기로 치환하고 비교부에 위상비교회로를 사용하면 PLL 제어에 의한 정속제어 회로를 만들 수도 있다.

하지만 위와 같은 방법은 하드웨어적인 정속제어 방법으로 추가의 하드웨어 장치를 설치해야하며 기준전압 입력 또한 디지털 데이터 값으로 전달해 주기 어려운 단점이 있다. 따라서 본 논문의 KMU-ROV는 전용 조종기에서 나오는 가변적인 기준 속도 값을 실시간으로 처리하여 정속제어하기 위한 소프트웨어적인 방법을 설계, 적용하였다.

새롭게 적용한 소프트웨어적인 정속제어에 필요한 기본요소를 2가지로 압축하였다. 그 기본요소로서 모터의 현재 속도를 측정하기 위한 단위 시간에 따른 엔코더 값과 목표가 되는 기준속도이다.

2ms 마다 엔코더 값을 피드백 받아 단위 시간(2ms) 당 모터의 회전속도를  $V_R$ 이라 하고 전용 조종기에서 실시간으로 받는 기준속도 즉, 목표속도를

$V_T$ 이라 한다.

이 두 속도를 비교해서 발생하는 오차를 제거하도록 Fig. 4.12에서 보는 것과 같이 PID제어를 적용하여 모터의 회전 속도를 일정하게 유지도록 Fig. 4.13과 같이 프로그래밍 하였다.

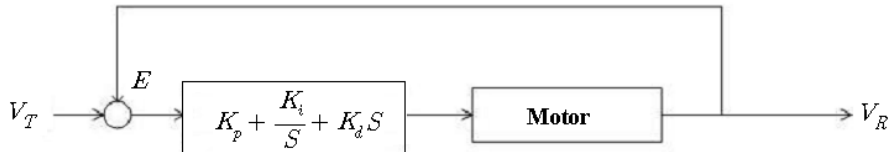


Fig. 4.12 PID controller for the concurrent control

```
void c_int2(void)          //Timer Interrupt (Period = 2ms)
{
    /* Motor 1 */
    Err = (signed long)((velocity - ENC1) / Reg_velocity);      //목표속도와 현재 속도의 차

    Err_sum += Err;
    if(Err_sum > 3000) Err_sum = 3000;
    if(Err_sum < -3000) Err_sum = -3000;

    Output1 = (double)(Kp*Err + Ki*Err_sum + Kd*(Err-Err_old));

    /* Motor 2 */
    Err2 = (signed long)((velocity2 - ENC2) / Reg_velocity2);    //목표속도와 현재 속도의 차

    Err_sum2 += Err2;
    if(Err_sum2 > 3000) Err_sum2 = 3000;
    if(Err_sum2 < -3000) Err_sum2 = -3000;

    Output2 = (double)(Kp2*Err2 + Ki2*Err_sum2 + Kd2*(Err2-Err_old2));

    ENC1 = 0;           //2ms 마다 회전속도를 얻기위해 엔코더 입력 초기화
    ENC2 = 0;
}
```

Fig. 4.13 Program of the concurrent control

본 논문의 소프트웨어적 정속제어는 목표 속도의 입력에 상관없이 2ms 마다 엔코더 입력을 받아 현재 모터 회전속도 데이터를 업데이트한다. 따라서 전용 조종기로부터의 가변적인 모터속도 입력에 대해 실시간 정속제어가 가능하며 여러 모터를 동시에 정속제어 할 수 있다.

## 4.4 센서 구성 및 잠수정 위치 제어 알고리즘

### 4.4.1 KMU-ROV의 센서 구성

KMU-ROV는 외부의 조작 없이 위치 유지 및 자세제어를 능동적으로 처리한다. 위치 유지 및 자세제어를 위해서 잠수정의 호버링 제어, 깊이 제어 및 방향각 제어가 필요하다. 이러한 제어를 위해 KMU-ROV의 위치 및 자세에 대한 정보를 실시간으로 받아야 한다.

KMU-ROV에 장착된 센서는 Table 4.2에 정리하였다.

Table 4.2 Sensor of the KMU-ROV

Sensor	Model	Output type
Tilt sensor	SCA100T	Analog (2 axis)
Depth sensor	ECO-1	Current (4~20mA)
Magnetic compass	CMPS_03	PWM
Camera	Water eye 500	NTSC

무인 잠수정은 항해 중 불규칙한 조류의 영향으로 피칭과 롤링의 평형을 유지하기 힘들어지는 경우가 많다. 수중 작업의 효율을 높이기 위해 기울기 센서(Tilt sensor)를 사용하여 선체의 피칭과 롤링의 평형을 유지하는 호버링 제어를 하였다.

사용한 기울기 센서인 SCA100T는 아날로그 형태로 2축 기울기 값을 출력한다. 센서 DSP와 인터페이스하기 위한 기울기 센서 보드를 Fig 4.14에서 보는 것과 같이 제작하였다.

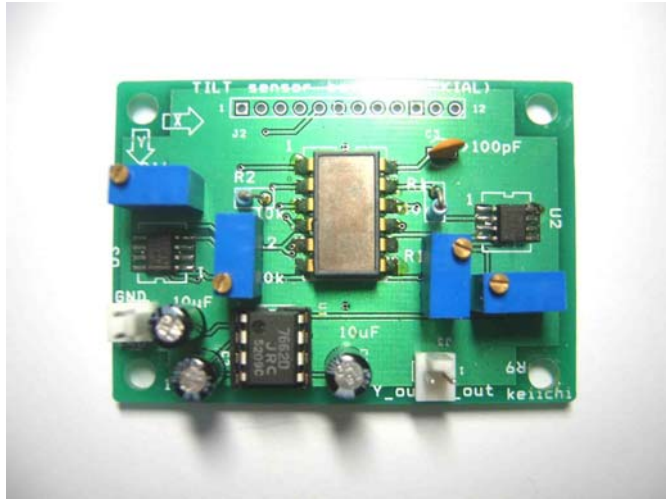


Fig. 4.14 Interface board of 2 axis tilt sensor

수중 로봇으로 작업 시 카메라를 이용하여 운용을 하지만 정확한 방향을 알기 힘들다. 따라서 KMU-ROV는 방향각(Heading angle)을 측정할 수 있는 Fig. 4.15와 같은 자력 컴퍼스(Magnetic compass)를 사용하였다.

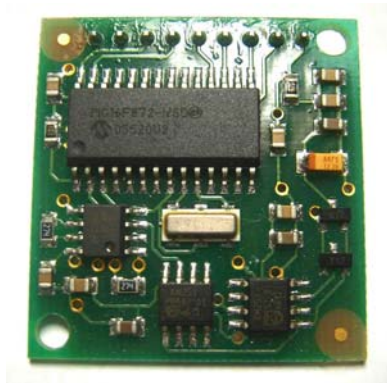


Fig. 4.15 Magnetic compass

수중 조사와 작업을 위해 KMU-ROV는 수심 60m까지 측정 가능한 압력 센서 ECO-1을 사용하여 작업 수심을 능동적으로 조절하며 현재 수심을 모

니터링 할 수 있다. Fig. 4.16는 사용한 압력센서의 사진이다.



Fig. 4.16 Pressure sensor ECO-1

KMU-ROV의 운용 목적 중 하나가 근해의 해양 환경 조사이다. 해양 환경 조사를 위한 관측 장비로 Fig. 4.17과 같은 수심 200m에서도 운용 가능한 방수 처리된 41만 화소 CCD 카메라를 사용하였다.



Fig. 4.17 Waterproof CCD camera

#### 4.4.2 실시간 복합 PID 제어 알고리즘

KMU-ROV의 제어 알고리즘은 기본적으로 모터 속도제어에 연산시간이 적게 걸리고 실용성이 높은 PID제어를 적용하였다.

KMU-ROV의 모터 구동의 입력 값으로 정속제어를 위해 엔코더로부터 모터의 회전속도 정보를 피드백 받고 동시에 위치 유지 및 자세 제어를 위해 센서로부터 위치 및 자세 정보를 피드백 받는 폐루프 구조이다.

롤링과 피칭 제어를 위한 기울기 센서의 기울기 정보, 요잉 제어를 위한 자력 컴퍼스 센서의 방향 정보, 깊이 제어를 위한 압력센서의 깊이정보를 DSP에서 피드백 받은 뒤 현재 KMU-ROV의 위치 및 상태 정보에 대해 PID제어한 출력을 모터 속도 데이터로 되돌려 준다.

동시에 또 다른 PID제어의 입력 값으로 엔코더로부터 모터 회전 속도의 정보를 피드백 받아 정해진 모터 속도를 일정하게 구동하는 정속제어를 한다.

따라서 KMU-ROV를 운용하기 위해 사용자가 입력하는 값은 잠수정의 운동을 결정하는 6자유도에 대한 속도 값이지만 모터의 속도를 결정하기 위해서는 두 개의 PID제어기가 사용되는 새로운 형태의 실시간 복합 PID제어 알고리즘을 Fig. 4.18과 같이 설계하였다.

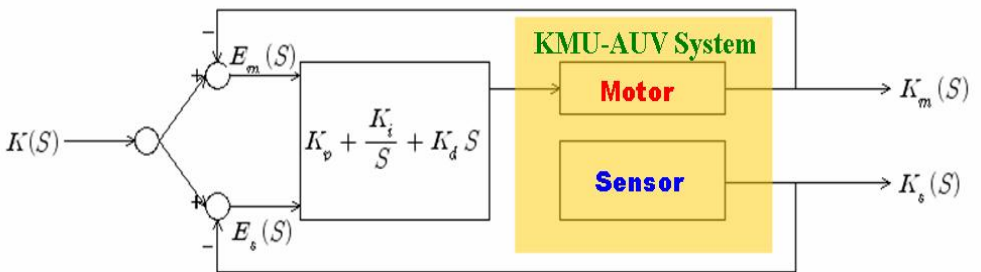


Fig. 4.18 Realtime hybrid PID controller

Fig. 4.18에서 명령입력벡터  $K(S)$ 는 전용 조종기에서 KMU-ROV에 송신하는 잠수정의 6자유도 구동 데이터, 좌우 기울기, 요 축 회전각 그리고 깊이에 대한 기준입력 신호를 나타낸다. 또한, 기준입력 신호에 따라 KMU-ROV의 출력신호로 나오는  $K_m(S)$ 는 모터 엔코더 센서의 회전 속도값이다. 신호벡터  $K_s(S)$ 는 기울기 센서로부터의 기울기 정보, 자력 컴퍼스로부터의 요 축 회전각, 압력센서로부터의 깊이정보를 나타낸다. 여기서 비례 제어 상수  $K_p$ , 적분제어 상수  $K_i$ , 미분제어 상수  $K_d$ 는 Table 4.3과 같이 설정하였다.

Table 4.3 Gain of PID control

제 어	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Rolling 제어	4.0	0.2	0.4
Pitching 제어	2.0	0.2	0.3
Yawing 제어	0.2	0.02	0.02
Depth 제어	1.5	0.05	0.08



본 논문에서 설계한 실시간 복합 PID 제어를 프로그램화하기 위한 순서도는 Fig. 4.19와 같다.

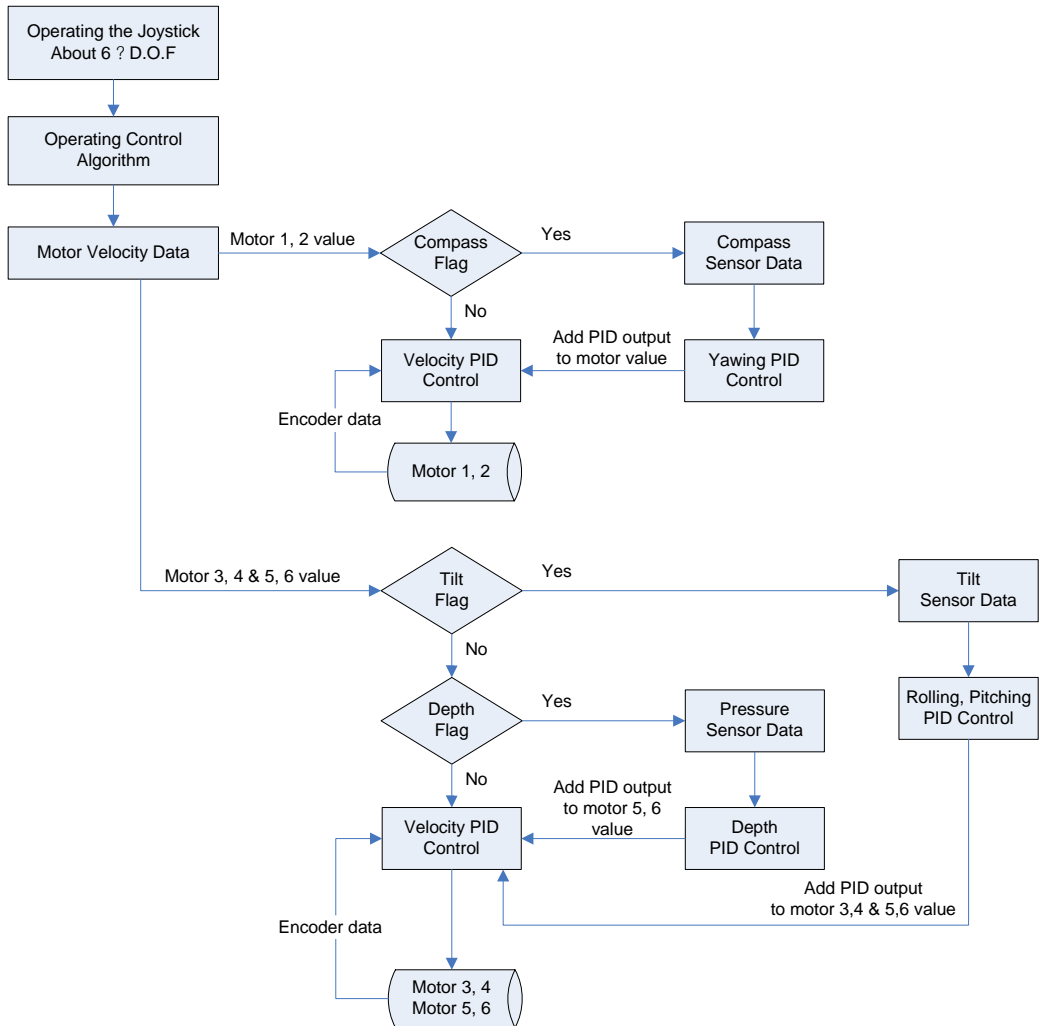


Fig. 4.19 Flow diagram of the realtime hybrid PID control

아래의 Fig. 4.20는 실시간 복합 PID 제어기의 순서도에 따라 프로그램화한 부분 중에서 기울기 자세 유지 부분을 간략화한 것이다.

```
void Tilt_PID(int target_roll, int target_pitch)
{
    //rolling pid control//
    Err = target_roll - tilt_value_roll;
    Err_sum += Err;

    tilt_Out_roll = (int) (Kp*Err + Ki*Err_sum + Kd*(Err-Err_old));

    Err_old = Err;

    //pitching pid control//
    Err_p = tilt_target_pitch - tilt_value_pitch;
    Err_sum_p += Err_p;

    tilt_Out_pitch = (double) (Kp_p*Err_p + Ki_p*Err_sum_p + Kd_p*(Err_p-Err_old_p));

    Err_old_p = Err_p;

    Target_velocity_roll = Motor_velocity_1+tilt_Out_roll;
    Target_velocity_pitch = Motor_velocity_3-tilt_Out_pitch;
}
```

Fig. 4.20 Program of the realtime hybrid PID control

## 제 5 장 전용 조종기의 개발

무인 잠수정을 운용할 경우 PC를 이용할 경우 데이터 수집이 용이한 장점이 있지만 선박의 선저 면과 근해의 해양 환경의 조사를 주목적으로 하는 KMU-ROV의 경우 운용 준비 시간과 공간이 많이 필요하다. 따라서 PC보다 휴대가 간편한 전용 ROV 조종기를 개발하였다.

### 5.1 조종기의 구성

Fig. 5.1과 같이 KMU-ROV의 전용 조종기를 제작, 개발하였다.



Fig. 5.1 Operating joystick of the KMU-ROV

무인 잠수정은 불규칙한 해양 환경에서 6자유도를 제어해야 한다. 이를 위해 8bit 프로세서인 ATmega128을 이용하여 2개의 조이스틱으로부터 아날로그 입력을 받아 6자유도에 대한 6개 모터의 속도데이터를 KMU-ROV로 보내준다. 2개의 조이스틱은 보다 효율적이며 간편한 조종 환경을 제공한다.

조이스틱 사이의 텍스트 LCD는 현재 KMU-ROV의 깊이정보 및 각도정보를 확인할 수 있으며, 아래의 키패드는 KMU-ROV의 깊이 및 각도 제어의 목표데이터를 입력할 수 있는 제어 입력부이다.

Fig. 5.2는 텍스트 LCD의 제어 입력 및 동작 사진이다.



Fig. 5.2 View of the text LCD

수중카메라의 영상을 볼 수 있도록 Color LCD를 장착하여 실제 운용되고 있는 다른 ROV와 같은 환경을 제공하며 본래의 목적인 해양 환경 및 연근해 조사의 임무를 수행할 수 있도록 하였다.

## 5.2 6자유도 조종 알고리즘

KMU-ROV의 6자유도 조종을 위해 각 자유도에 대한 구동모터와의 관계를 해석해야 하며 그 관계식을 이용하여 조종기에서는 최종적으로 각 모터의 속도데이터만을 보내주도록 하였다.

Fig. 5.3은 본 논문에서 사용된 KMU-ROV의 좌표계이다.

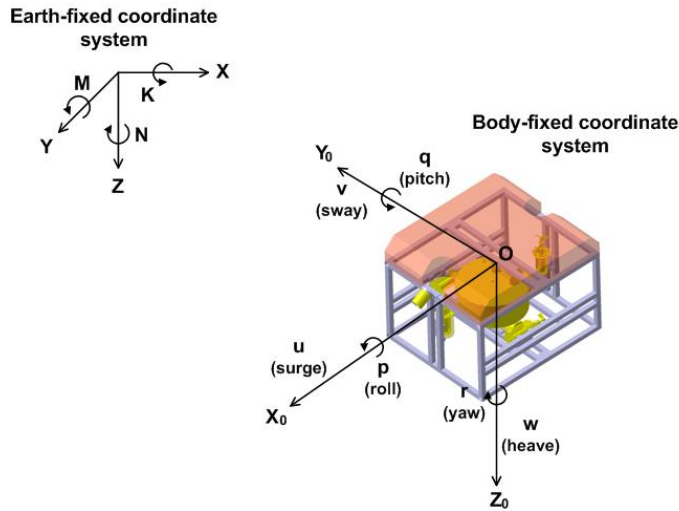


Fig. 5.3 The coordinate system of the KMU-ROV

2개의 조이스틱 중 오른쪽 스틱은 주 조종 스틱으로 직진, 횡, 깊이, 요 방향 ( $x, y, z, \psi$ )의 4자유도 제어를 하며, 왼쪽 스틱은 피치, 롤 방향 ( $\phi, \theta$ )의 2자유도 제어를 할 수 있도록 하였다.

위와 같은 조이스틱의 6자유도 입력에 대해 잠수정의 운동을 위해 추진기와 관계식 정립이 필요하다.

즉, 6자유도 힘과 모멘트 벡터  $\tau = [\sum X, \sum Y, \sum Z, \sum K, \sum M, \sum N]^T$ 와 각 추진기의 추력 벡터  $F = [F_{M1}, F_{M2}, F_{M3}, F_{M4}, F_{M5}, F_{M6}]^T$ 의 관계식을 정립하고, 최종적으로 조이스틱의 운동 명령 데이터인 각 모터의 추력에 대한 관계식을 도출하여야 한다.

Fig. 5.4는 6개 추진기의 추력  $F$ 에 대한 정의와 KMU-ROV의 무게 중심에서 각 추진기의 거리  $\ell$ 에 대해 정의하였다.

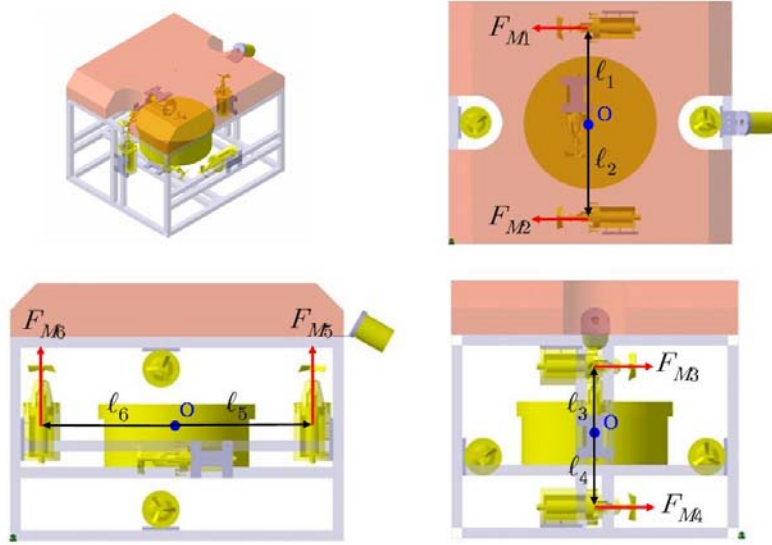


Fig. 5.4 Definition thrust and distance of the KMU-ROV

Fig. 5.4로부터 6자유도 힘과 모멘트 벡터에 대한 추진기의 추력 벡터의 관계식은 식 (5.1)과 같이 정의할 수 있다. 여기서 6자유도 힘과 모멘트 벡터는 식 (2.17)의 힘과 모멘트 벡터와 동일한 벡터이다.

$$\Sigma X = F_{M1} + F_{M2}$$

$$\Sigma Y = F_{M3} + F_{M4}$$

$$\Sigma Z = F_{M5} + F_{M6}$$

$$\Sigma K = F_{M3} \ell_3 - F_{M4} \ell_4$$

$$\Sigma M = F_{M5} \ell_5 - F_{M6} \ell_6$$

$$\Sigma N = F_{M1} \ell_1 - F_{M2} \ell_2$$

(5.1)

실제 조이스틱 명령 데이터인 각 추진기의 추력 벡터에 대해 식 (5.2)와 같이 다시 정의하였다.

$$\begin{bmatrix} F_{M1} \\ F_{M2} \\ F_{M3} \\ F_{M4} \\ F_{M5} \\ F_{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\ell_1} \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2\ell_2} \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2\ell_3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2\ell_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2\ell_5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2\ell_6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

식 (5.2)에서 각 추진기의 추력인  $F = [F_{M1}, F_{M2}, F_{M3}, F_{M4}, F_{M5}, F_{M6}]^T$ 는 KMU-ROV의 Master DSP로 송신되어 모터 속도 값으로 변환된다.

## 제 6 장 실험 및 고찰

KMU-ROV의 운동 성능 향상을 위해 개발한 소프트웨어적 정속제어의 실험을 수행하였고, KMU-ROV의 성능을 확인하기 위하여 선착장에서의 주행 실험 및 위치 유지 및 자세 제어 실험을 실시하였다.

### 6.1 모터의 정속 제어 실험

두 개의 모터를 대상으로 같은 속도 값을 주었을 때 단위 시간(2ms) 당 엔코더 값을 측정하였다. 여기서, 단위 시간 당 엔코더 값은 절대적인 모터의 회전 속도와 같다.

입력한 속도 값은 500, 400, 300, 100으로 총 4회에 걸친 실험을 실시하였으며 x축은 단위시간(2ms)이며, y축은 단위 시간 당 엔코더 입력 값이다.

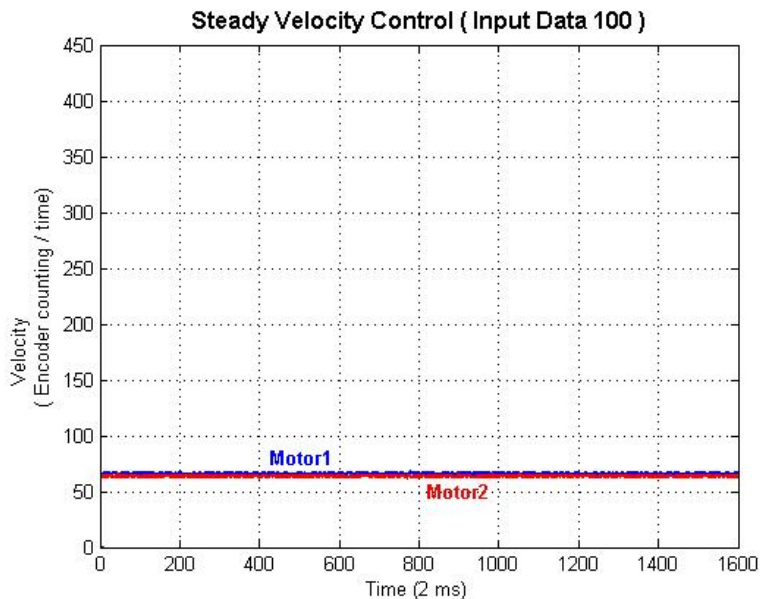


Fig. 6.1 Concurrent control with result (Input data 100)



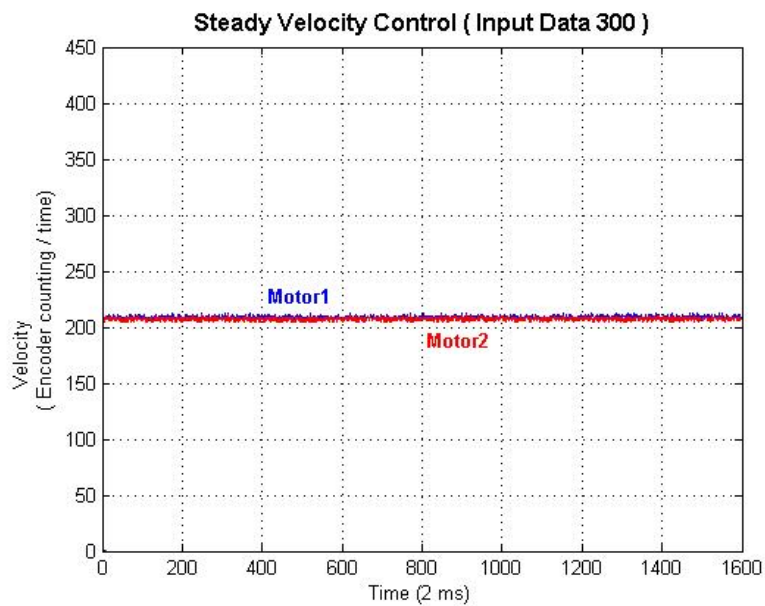


Fig. 6.2 Concurrent control with result (Input data 300)

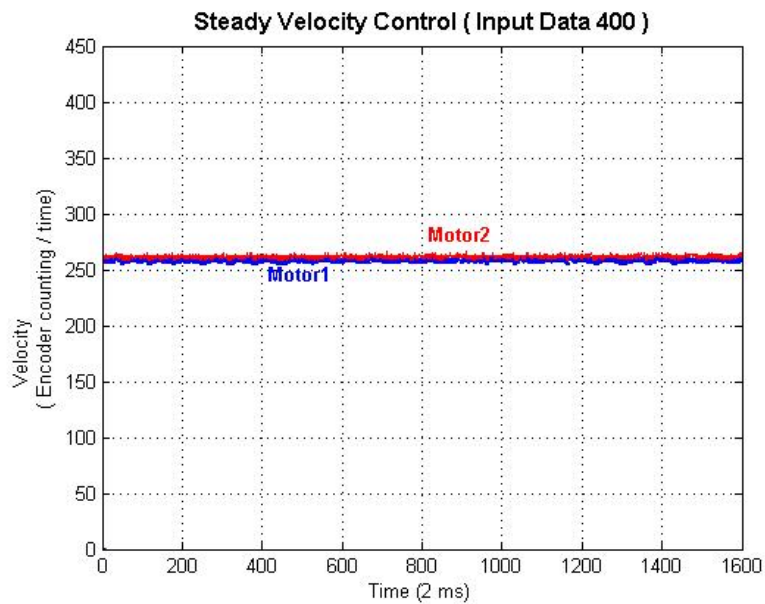


Fig. 6.3 Concurrent control with result (Input data 400)

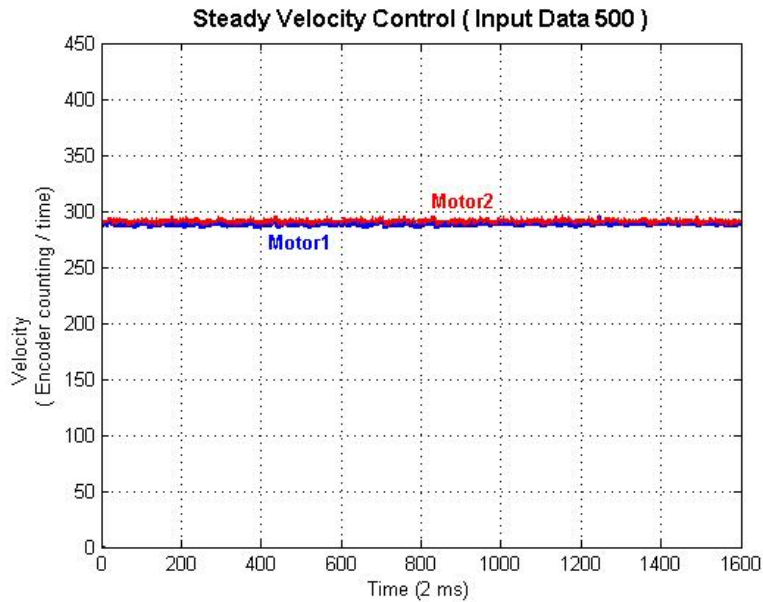


Fig. 6.4 Concurrent control with result (Input data 500)

위의 그림들은 4.3.2 절에서 소개한 새로운 소프트웨어적 정속제어를 4가지의 입력에 따른 모터의 절대속도의 결과 값이다.

이 결과는 별다른 하드웨어적인 장치 없이 엔코더 입력만으로 정속제어가 가능함을 보여주고 있으며, 나아가 두 모터의 단위 시간(2ms) 당 엔코더의 값이 거의 일치하는 것은 여러 대의 모터를 동시에 같은 속도로 제어하여 KMU-ROV의 직진 성능 및 주행 성능을 높여줄 수 있다는 것을 보여준다.

## 6.2 KMU-ROV의 주행 실험

모터 정속 제어 알고리즘을 적용한 KMU-ROV의 주행 성능의 실험과 전용 조종기를 이용한 6자유도 운동 성능 실험을 선착장에서 실시하였다.

Fig. 6.5는 KMU-ROV의 주행 실험을 하는 모습이다.



Fig. 6.5 Sailing test in the sea

다소 외란이 있는 해양 환경에서도 Fig. 6.5와 같이 만족할만한 직진 성능을 확인하였으며 전용 조종기로부터 보내지는 구동 명령에 따라 6자유도 운동이 가능한 것을 확인하였다.

## 6.3 KMU-ROV의 위치 유지 및 자세 제어 실험

KMU-ROV의 자세 유지 제어 실험을 위해 실 해역에서 호버링, 깊이, 방향각 제어를 실시하였다.

### 6.3.1 KMU-ROV의 호버링 제어 실험

수중에서 KMU-ROV를 인위적으로 수평을 틀리게 한 뒤 피칭과 롤링의 수평을 능동적으로 유지하는 알아보는 호버링 제어를 실험하였다.

Fig. 6.6은 호버링 제어 실험의 모습이며, Fig. 6.7은 실험하는 동안 기울기 센서에서 롤링과 피칭의 데이터를 받은 결과 값이다.



Fig. 6.6 Hovering control test in the sea

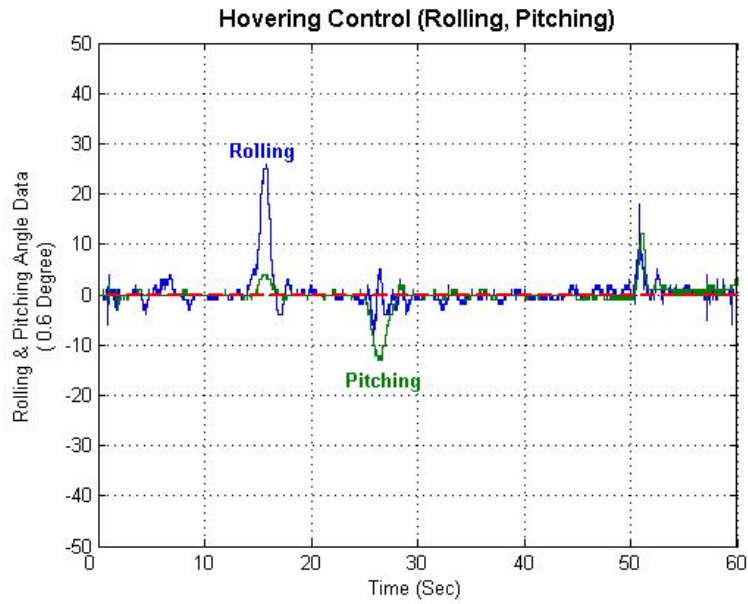


Fig. 6.7 Hovering control with result

Fig. 6.7에서는 KMU-ROV를 임의로 수평을 틀었음에도 빠른 시간 안에 수평을 유지하는 것을 보여주고 있다.

### 6.3.2 KMU-ROV의 깊이 제어

전용 조종기에서 잠항할 목표 수심의 데이터를 KMU-ROV로 전송한 뒤 목표한 수심에서 위치를 유지하는지 알아보는 깊이 제어 실험을 하였다.

Fig. 6.8과 같이 수면에서부터 시작하여 2m와 4m까지 잠항 한 뒤 40~50초 정도에서 다시 수면으로 부상하는 깊이 제어를 개별적으로 실험하고, 압력 센서로부터 깊이 정보를 수집하였다.



Fig. 6.8 Depth control test in the sea

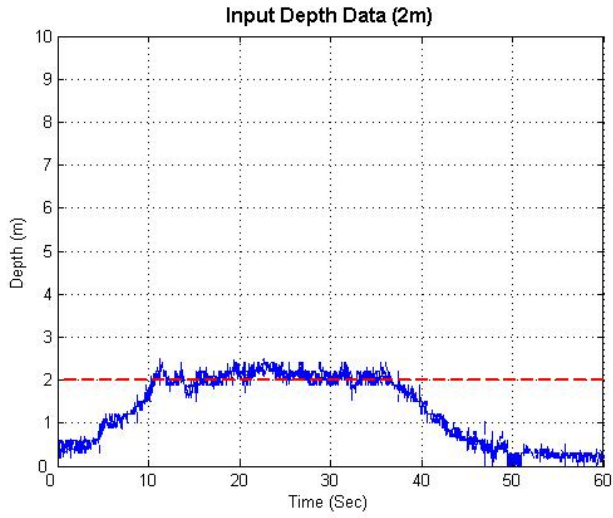


Fig. 6.9 Depth control with result (Input data 2m)

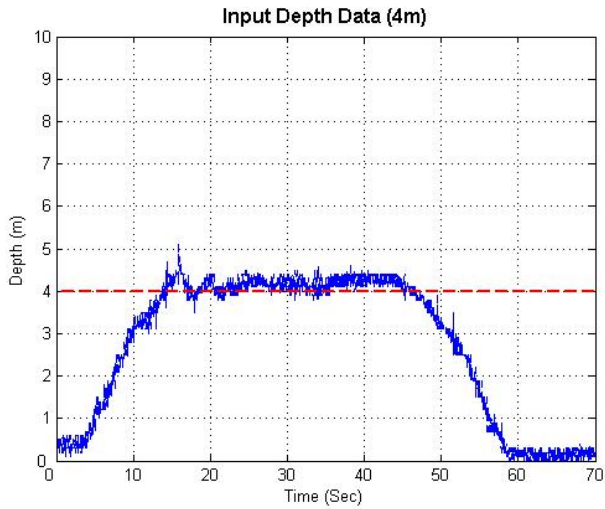


Fig. 6.10 Depth control with result (Input data 4m)

Fig. 6.9과 Fig. 6.10는 목표 수심을 2m와 4m로 개별적으로 실험을 수행한 결과이다. 결과에서처럼 KMU-ROV가 외란이 많은 해양 환경에서도 진동이 발생하지만 목표 수심을 유지하는 만족할 만한 결과를 얻었다.

### 6.3.3 KMU-ROV의 방향각 제어

전용 조종기에서 목표 방향각의 데이터를 KMU-ROV로 전송한 뒤 목표한 방향각으로 자세 제어를 하는지 알아보는 실험을 실시하였다.

Fig. 6.11과 같이 수면에서 초기 방향각과 상관없이 목표 방향각을  $100^{\circ}$ 에서  $250^{\circ}$ 로 변환하며 방향각 제어 실험을 하고, 자력 컴퍼스로부터 방향각의 정보를 수집하였다.

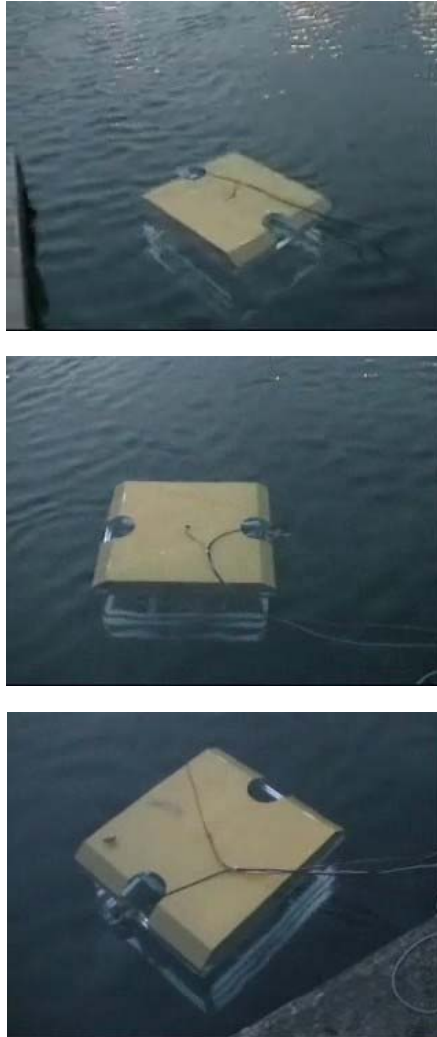


Fig. 6.11 Yawing control test in the sea



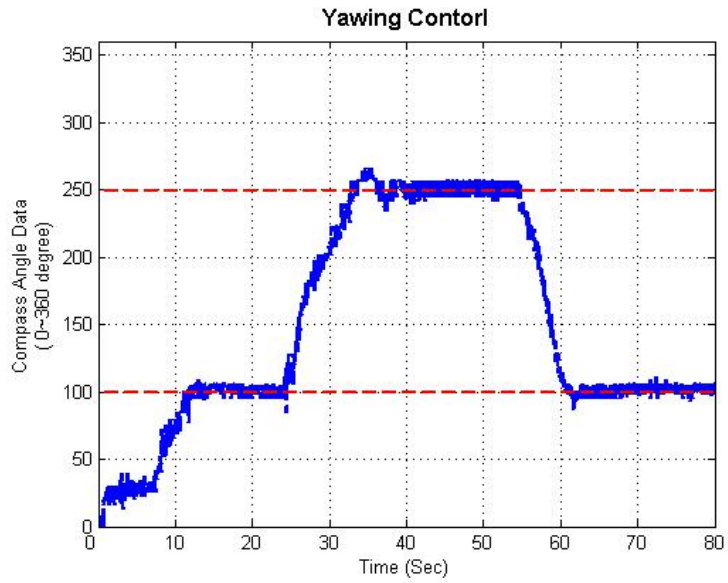


Fig. 6.12 Yawing control with result

Fig. 6.12은 목표 방향각이  $100^{\circ}$ 에서  $250^{\circ}$ 로 변환되는 방향각 제어 실험을 수행한 결과이다. 해양 환경의 영향으로 진동이 발생하지만 목표 방향각을 유지하려는 경향을 볼 수 있다.

#### 6.3.4 해양대 선착장 수중환경 조사

KMU-ROV 주행 및 제어 실험을 실시한 해양대 선착장의 수중환경을 카메라를 이용하여 조사하였다.

Fig. 6.13는 해양대 선착장의 해조류와 해양 생물의 모습이다.

해양대 선착장은 부유물이 많아 시야가 탁하여 선명한 영상을 얻지는 못하였다. 하지만, 해조류, 조개 그리고 물고기 등 여러 해양 생물을 관찰할 수 있었다. 이는 근해 해양 환경 및 선박의 선저면 조사에 사용하여 보다 효율적으로 운용될 수 있음을 알 수 있었다.

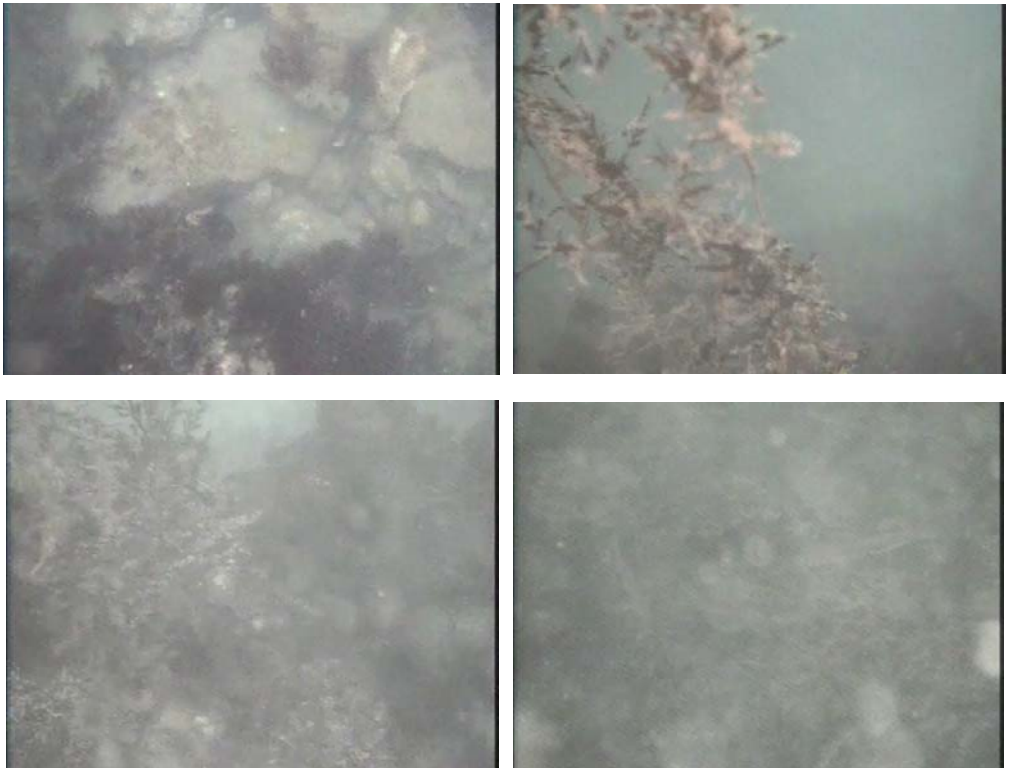


Fig. 6.13 Underwater investigation in a wharf

## 제 7 장 결 론

본 논문에서는 수심 50m급의 근해 조사를 목적으로 하는 무인잠수정 KMU-ROV의 설계 및 제작과정에 대해 기술하였다.

수중에서 6자유도 운동이 가능하도록 6개의 추진기를 새로운 형태로 배치하여 설계하였으며, 일반 DC모터를 수중에 적용하기 위해 미케니컬 씰을 이용한 방수추진기를 설계하여 경제적인 무인잠수정을 제작하였다.

KMU-ROV의 항해를 위한 제어시스템은 Master DSP 보드와 센서 DSP 보드 및 모터 제어기로 구성되며 CAN 통신을 이용한 네트워크를 구성하였다. 이 시스템은 6개의 모터를 동시제어 함에 있어 보다 빠르고 신뢰성 있는 환경을 제공하였다.

운항 시 직진 성능 및 조종 성능을 향상시키기 위해 새로운 소프트웨어적 모터 정속제어 기법을 설계하고 검증하였다. 이는 별다른 하드웨어적인 장치 없이 구현할 수 있는 장점이 있으며, 가변적인 입력에 대해 여러 대의 모터를 동시에 정속제어 할 수 있다는 것을 확인하였다.

그리고 KMU-ROV는 외부의 원격 조종 없이 실시간으로 자세 유지 제어를 할 수 있도록 센서와 모터 엔코더의 신호 데이터를 기반으로 실시간 복합 PID 제어기를 설계하였으며, 선착장에서 위치 유지 및 자세 제어 실험을 시행하여 보다 효율적인 운용성능을 가진 것을 확인할 수 있었다.

KMU-ROV의 비선형 6자유도 운동 방정식 해석을 통해 속도 및 가속도식을 정립하였고 조이스틱으로 조종되는 추진기와 로봇의 운동에 대한 관계식을 정립하였다. 이를 바탕으로 전용 조종기를 이용하여 6자유도 원격 조종이 가능하며, 잠수정의 잠항 깊이, 각도 정보를 확인할 수 있고 카메라를 이용하여 영상을 확인함으로써 근해의 해양환경 조사 및 선박의 선저 면을 조사할 수 있도록 하였다.

향 후 외란을 포함한 소프트웨어적 정속 제어 알고리즘을 검증할 필요가 있으며, KMU-ROV의 개별적으로 제어되는 호버링 제어, 깊이 제어 그리고 방향각 제어를 통합하여 성능 개선 및 실용성을 위해 보다 안정적인 제어 알고리즘을 연구해야하며 카메라로부터 획득한 영상 및 해양환경의 정보를 저장하고 실시간성을 향상시키기 위한 리얼타임 운영체제의 사용이 필요하다.

그리고 본 논문은 다소 외란이 적은 선착장에서 실험을 행하였다. 향 후 외란이 강한 실 해역에서의 실험과 수정을 해야 하는 과제를 남겨두고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이판목, "Development an Advanced Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle", 한국해양연구원, pp. 349, 2003.
- [2] 권경엽, “ MVFF를 이용한 자율 수중 로봇의 제어에 관한 연구”, 창원대학교, pp. 10~11, 2005.
- [3] 김기훈, “무인잠수정 SNUUV I의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석”, 서울대학교, pp. 5, 2005.
- [4] Thor I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons, 1994.
- [5] 한종희, “수중 작업을 위한 소형 무인 잠수정/매니플레이터 시스템의 개발”, 국방로봇 기술 시범 및 워크샵, pp. 44~45, 2006.
- [6] 현범수, “저항추진론”, 한국해양대학교 해양시스템 공학부, pp.35~40, 2004.
- [7] TMS320LF2407A User Guide, Texas Instrument. Inc.
- [8] Hiroshi Sakai et al., "Autonomous Towed Vehicle for Underwater Inspection in a Port Area", IEEE ICRA05, Vol 1, 2005

- [9] 서주노, 최중락, “자율무인잠수정의 수중도킹을 위한 제어기 설계”, 국방수중로봇 워크샵, 2005.
- [10] 이판목 외, “심해무인잠수정 해미래와 해누비의 개발”, 국방수중로봇 워크샵 2005, pp. 30~32, 2005.10.
- [11] D. A. Smallwood, L. L. Whitcomb, "Adaptive Identification of Dynamically Positions Underwater Robotic Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, pp. 505~515, 2003.
- [12] J. Yuh, "Development in Underwater Robotics" Robotics and Automation, 1995 Proceedings, 1995 IEEE International Conference, Vol 2, pp. 1862~1867, May 1996
- [13] T. I. Fossen, "Underwater Robotics Vehicle Dynamics", Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994
- [14] 홍도천, 이판목 외 7명, “무인잠수정(ROV)의 설계 및 개발”, 한국해양공학회지 제 7권 제1호, pp. 62~72, 1993.
- [15] 이판목 외 2명, “자율무인잠수정(AUV)의 모의 실험을 위한 테스트 베드의 개발 하드웨어와 소프트웨어”, 한국해양공학회지 제11권 제 1호, pp. 106~112, 1997.

[15] 전봉환, 이관묵 외 3명, “네 대의 주 추진기를 이용한 무인잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어 시뮬레이션 및 실험”, 한국해양공학회지 제19권 제2호, pp. 67~73, 2005

[16] 최영수 외 3명, “원전 감시 점검을 위한 수중로봇 기술”, 수중로봇기술연구회 2006 추계 워크샵, pp. 23~27, 2006

[17] “드라이브 회로와 제어회로를 이해하는 모터제어의 하드웨어 기술”, 월간전자기술, 1995

## 감사의 글

실험실에서의 생활이 벌써 3년 6개월이나 지났습니다. 저에게 이 시간은 인생에 있어서 정말 많은 것을 배우고 느낄 수 있었던 시간이며 앞으로 사회에서 무슨 일을 해야 하는지... 가장 잘할 수 있는 것이 무엇인지... 그리고 나를 알게 하고 인생의 설계를 할 수 있었던 시간이었습니다.

저에게 이런 기회를 마련해 주시고 이끌어 주셨던 최형식 교수님께 고개 숙여 감사드리며, 본 논문을 마무리할 수 있도록 도움을 주셨던 유삼상 교수님, 조종래 교수님, 해군사관학교 서주노 교수님, 제주대 김준영 교수님께도 감사드립니다. 그리고 잠수정에 대해 서로 정보를 공유하며 도움을 주었던 변승우에게도 고맙다는 말을 전합니다.

실험실 여러 선배님들, 태형형님, 웅주형, 종훈, 동현, 원현, 동완, 동호, 형석, 진일, 재관... 동료라기보다는 가족처럼 느껴졌던 이들에게 많은 것을 얻고 갑니다. 짧은 시간이지만 함께 했던 시간은 잊지 못할 겁니다.

대학에 입학하여 동아리, 군대, 대학원까지 언제나 옆에서 함께 해왔던 동찬이... 고맙다. 사람들이 나와 나를 하나로 생각했었던 만큼 큰 힘이 되었었다.

상훈이 형, 주현, 경탄, 인규, 창기, 혜경이, 동아리 선후배들 그리고 지선양... 함께 대학 시절을 보내며 소중한 시간을 함께 해왔던 사람들에게도 감사의 글을 올립니다.

어린 시절 잊지 못할 추억들과 지금도 그리고 앞으로도 서로에게 힘이 되어줄 울산 방어진 친구들 인호, 태균, 호성, 인성, 동준, 일도, 진홍, 원진, 순곤, 진곤, 찬우.... 고맙다 친구들아..

마지막으로 가슴 벅찰 만큼 행복한 이 세상을 알게 하시고, 보게 하시고, 느낄 수 있게 해주신 분들, 미래 저의 청사진이신 아버지, 저의 이상형이신 어머니 정말 감사합니다. 언제나 저에게 믿음을 주시고 사랑을 알게 해주셨습니다. 그리고 무엇을 주어도 아깝지 않을 동생 혜진이...

가족의 존재가 저의 행복입니다. 사랑하는 가족들 감사합니다.



그 외에도 너무나 많은 사람들이 제 스승이었고 친구였습니다. 그들에게 배우고, 희망을 얻었습니다. 제 인생에 있어 많은 것을 깨우치게 해준 모든 이들...

이 모든 분에게 감사의 마음을 전하며, 이 논문을 바칩니다.

2008년 1월 1일

김 경 기

“세상과 함께 호흡하라! 나를 싫어하는 세상일지라도...”

“실패를 두려워하지 마라! 삶을 무너뜨리는 것은 절망하는 자신의 마음뿐이다.”